

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

---

**Fakulta strojní**



**Metalurgické vlivy na výrobu tenkostěnných  
odlitků pro automobilový průmysl z LKG  
s vyšším obsahem křemíku**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2009**

**Pavel Tvrzník**

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## Fakulta strojní

Studijní program M2301 – Strojírenství

Strojírenská technologie  
zaměření strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení strojírenské metalurgie

**Metalurgické vlivy na výrobu tenkostěnných odlitků pro  
automobilový průmysl z LKG s vyšším obsahem křemíku**

**Metallurgical influence of production of tin-walled from high  
silicon content spheroidal graphite cast iron for car industry**

Pavel Tvrzník

**KSP - SM - 550**

Vedoucí diplomové práce:  
Konzultant diplomové práce:

Prof. Ing. Iva Nová, CSc. – *TU v Liberci*  
Ing. Iva Nováková, Ph. D. – *TU v Liberci*

### **Rozsah práce a příloh:**

Počet stran	62
Počet tabulek	13
Počet příloh	- -
Počet obrázků	49

5. 6. 2009

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**Fakulta strojní**

**Katedra strojírenské technologie**  
**Oddělení strojírenské metalurgie**

Studijní program: M 2301 – Strojní inženýrství

Diplomant: Pavel Tvrzník

Téma práce: **Metalurgické vlivy na výrobu tenkostěnných odlitků pro automobilový průmysl z LKG s vyšším obsahem křemíku**

**Metallurgical influence of production of tin-walled from high silicon content spheroidal graphite cast iron for car industry**

Číslo DP: KSP - SM - 550

Vedoucí DP: prof. Ing. Iva Nová, CSc. – TU v Liberci

Konzultant: Ing. Iva Nováková, Ph.D. – TU v Liberci

**Abstrakt:** Diplomová práce shrnuje předchozí poznatky o výrobě odlitků z litiny s kuličkovým grafitem. Dále se zabývá studiem vlivu technologických parametrů a chemického složení na mechanické vlastnosti zkušebních odlitků.

**Abstract:** The thesis summarizes previous knowledge about production of castings made of spheroidal graphite cast iron. Furthermore this thesis is engaged in studying of influence of technological parameters and chemical composition on mechanical properties of specimen castings.

**Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Českém Dubu, 5. 6. 2009

.....  
Pavel Tvrzník  
Předměstí 100  
463 43 Český Dub

## P o d ě k o v á n í

Děkuji všem, kteří svou pomocí přispěli při vzniku této Diplomové práce. Zejména prof. Ing. Ivě Nové, CSc. a Ing. Ivě Novákové, Ph.D. za vedení a odborné rady a připomínky. Dále panu Drahoslavu Vinšovi za praktickou pomoc při provádění experimentálních prací.

Největší dík patří mým rodičům za podporu během celého studia.

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>2. REŠERŠNÍ ČÁST PRÁCE .....</b>	<b>11</b>
2.1 CHARAKTERISTIKA GRAFITICKÝCH LITIN .....	11
2.2 PŘEHLED VLASTNOSTÍ ZÁKLADNÍCH DRUHŮ GRAFITICKÝCH LITIN .....	12
2.2.1 Litina s lupínkovým grafitem (LLG, resp. dle ČSN EN 1561 - GJL ) .....	12
2.2.2 Litina s červíkovým grafitem (LČG, resp. dle ČSN EN - GJV) .....	13
2.2.3 Litina s kuličkovým grafitem (LKG, resp. dle ČSN EN 1563 - GJS ) .....	14
2.2.3.1 Mechanické vlastnosti LKG .....	14
2.2.3.2 Slévárenské vlastnosti LKG .....	15
2.3 VLIV PŘÍSADOVÝCH PRVKŮ NA VLASTNOSTI LKG .....	16
2.3.1 Soustava Fe-C-Si .....	18
2.4 TAVENÍ LITINY S KULIČKOVÝM GRAFITEM .....	19
2.4.1 Vsázkové suroviny .....	19
2.4.2 Přehled tavicích agregátů .....	20
2.5 KRYSTALIZACE LITIN .....	23
2.6 MODIFIKACE A OČKOVÁNÍ .....	25
2.6.1 Modifikace .....	25
2.6.1.1 Modifikace Mg .....	30
2.6.1.2 Modifikace kovy vzácných zemin .....	30
2.6.2 Očkování .....	31
<b>3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE .....</b>	<b>33</b>
3.1 POPIS PŘÍPRAVY SLÉVÁRENSKÝCH FOREM .....	33
3.1.1 Odlitek pro zkoumání vhodné struktury LKG .....	33
3.2 PŘÍPRAVA TAVENINY LKG .....	35
3.2.1 Tavicí zařízení a vsázkový materiál .....	35
3.2.2 Vzorčky pro zjišťování chemického složení .....	37
3.3 VLASTNÍ PROVÁDĚNÍ EXPERIMENTU .....	37
3.3.1 Provádění taveb LKG .....	37
3.4 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ .....	39
3.4.1 Stanovení chemického složení jednotlivých taveb LKG .....	39
3.4.2 Měření tvrdosti odlitků .....	40
3.4.3 Stanovení mikrostruktury .....	42
3.4.4 Stanovení meze pevnosti v tahu .....	52
<b>4. DISKUSE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>56</b>
<b>5. ZÁVĚR .....</b>	<b>59</b>
<b>6. LITERATURA .....</b>	<b>61</b>

## Seznam použitých zkratk a symbolů

A	- tažnost [%]
C-MM	- modifikační činidlo Cer-Mischmetall
E	- Youngův modul pružnosti [MPa]
GJL	- litina s lupínkovým grafitem
GJS	- litina s kuličkovým grafitem
GJV	- litina s červíkovým grafitem
HB	- tvrdost dle Brinella
KVZ	- kovy vzácných zemin
LČG	- litina s červíkovým grafitem
LKG	- litina s kuličkovým grafitem
LLG	- litina s lupínkovým grafitem
TL	- temperovaná litina
$R_e$	- mez kluzu v tahu [MPa]
$R_m$	- mez pevnosti v tahu [MPa]
$R_{mo}$	- mez pevnosti v ohybu [MPa]
$\rho$	- hustota, měrná hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
s	- směrodatná odchylka
Sc	- stupeň eutektičnosti
$\sigma_c$	-mez únavy [MPa]
v	- variační koeficient
x	- výběrový (aritmetický) průměr

## 1. ÚVOD

Železo je jedním z nejvíce se vyskytujících kovových materiálů na naší Zemi. V současnosti se odlitky ze slitin železa s uhlíkem (oceli a litiny) uplatňují snad ve všech odvětvích průmyslu. Značné uplatnění při výrobě dílů, především v automobilovém průmyslu, nalézají grafitické litiny. V tomto odvětví průmyslu jsou kladeny požadavky zejména na chemickou čistotu, resp. strukturu, která je nositelem mechanických, resp. užitných vlastností odlitků. Je to z toho důvodu, že se konstruuje výkonnější automobily s menší hmotností, které si žádají stále kvalitnější odlitky a také menší spotřebu pohonných hmot.

Proto lze z dlouhodobého hlediska vysledovat procentuální úbytek produkce odlitků z litiny s lupínkovým grafitem (LLG), temperované litiny (TL) a především oceli na odlitky na úkor odlitků z litiny s kuličkovým grafitem (LKG) a slitin lehkých kovů. Jak je zřejmé ze statistiky výroby odlitků, poptávka odběratelů po odlitcích z LKG neustále roste a tím rostou též nároky na jejich kvalitu.

V současné době je věnována velká pozornost litině s kuličkovým grafitem, s vyšším obsahem křemíku, který se pohybuje od 2,40 do 4,10 %. Tento materiál nachází uplatnění v automobilovém průmyslu, kde byla snaha uplatnit litinu s kuličkovým grafitem, která by vykazovala homogenitu mechanických vlastností i při různé tloušťce stěn odlitku. Tato litina je používána zatím ve Švédsku a její výroba se řídila podle normy ISO 1083:2004 (E), jak uvádí BJÖRKEGREN [17]. Tento typ litiny vykazuje buď feritickou strukturu s pevností 400 MPa a tažností 15 % nebo feriticko-perlitickou strukturu s pevností 500 MPa a tažností 10 %. Nachází uplatnění při výrobě dílů automobilů Volvo a Scania. Tyto díly mají sloužit také k pohlcení nárazové energie. V naší republice s výrobou této litiny nejsou zkušenosti, i když byla již zahrnuta do evropské normy - EN 1563:1997, resp. ČSN EN 1563.

V tomto smyslu se též provádí výzkum s výrobou odlitků na Katedře strojírenské technologie, oddělení strojírenské metalurgie, Technické univerzity v Liberci, který je prováděn v rámci řešení Výzkumného záměru MSM 4674788501.



Současně je možno připomenout, že na podobné téma, v rámci výzkumného záměru MSM 4674788501, byla řešena moje bakalářská práce v roce 2006, která byla součástí podkladů doktorské práce Ing. Šmrhy (Vliv zvýšeného obsahu křemíku na mechanické vlastnosti tenkostěnných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem). Tato doktorská práce byla zaměřena především na sledování mechanických vlastností litiny s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem Si.

Součástí řešení této problematiky je též úkol při řešení mé diplomové práce, které se týká metalurgie LKG s vyšším obsahem křemíku pro výrobu odlitků s různou tloušťkou stěn.

## 2. REŠERŠNÍ ČÁST PRÁCE

### 2.1 CHARAKTERISTIKA GRAFITICKÝCH LITIN

Litiny jsou technické slitiny železa, uhlíku, křemíku, fosforu, síry a dalších přísadových prvků, kde obsah uhlíku je větší než 2,11% který tvoří ve struktuře eutektikum. Mají obsah C vyšší než je jeho mezní rozpustnost v austenitu za eutektické teploty.

Eutektikum slitiny železa a uhlíku se vytvoří vyloučením grafitu podle stabilní soustavy, nebo vyloučením cementitu podle metastabilní soustavy. Na vlastnosti odlitků z grafitických litin mají rozhodující vliv vlastnosti kovové matrice, tvar, rozložení a množství grafitu. Podle grafitu se litiny rozdělují na jednotlivé druhy, protože významným způsobem ovlivňuje jejich vlastnosti.

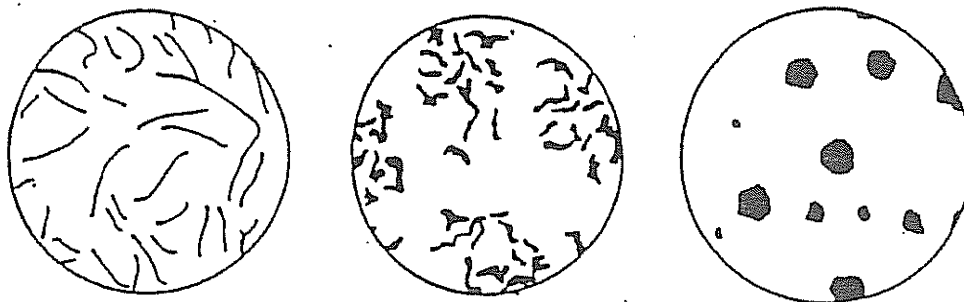
Základní stavební jednotkou matrice litin po odlití tvoří perlit, ferit nebo jejich směs. S větším množstvím perlitu se zvětšuje tvrdost, pevnost a odolnost proti opotřebení, naproti tomu s větším množstvím feritu stoupá tažnost a houževnatost litiny.

Podmínky ovlivňující strukturu litiny [12] :

- 1) Chemické složení taveniny;
- 2) Rychlost tuhnutí a chladnutí odlitků – tloušťka stěny, typ formy a jader;
- 3) Zárodečný stav taveniny – vliv očkování, modifikace, teploty a doby přehřátí taveniny;
- 4) Způsob tepelného zpracování.

U stabilního eutektika se může grafit vyloučit jak ve tvaru lupínků, červíků nebo kuliček [4]. Podle tvaru grafitu máme tři základní typy litin:

- litina s lupínkovým grafitem (LLG);
- litina s červíkovým grafitem (LČG);
- litina s kuličkovým grafitem (LKG)



Obr. 2.1 Tvar grafitu v litinách – neleptaný stav [10]

Krystalizace různých druhů litin se může značně lišit. To je vyvoláno vlivem dalších doprovodných prvků. Tyto prvky mohou buď tvorbu grafitu urychlit, nebo zpomalovat [4]. Současně velký význam u litin mají prvky Si, Mn, P a S.

Přesto, že se z důvodu přítomností eutektika ve struktuře litiny nedají tvářet, jsou významným konstrukčním materiálem, protože mají dobrou slévateľnost při poměrně nízkých teplotách lití. Litiny se vyrábí převážně přetavením slévárenského surového železa spolu s litinovým a ocelovým odpadem a se struskotvornými přísadami.

## 2.2 PŘEHLED VLASTNOSTÍ ZÁKLADNÍCH DRUHŮ GRAFITICKÝCH LITIN

### 2.2.1 Litina s lupínkovým grafitem (LLG, resp. dle ČSN EN 1561 - GJL )

Litina s lupínkovým grafitem se dříve označovala jako šedá. Grafit je u těchto litin vyloučen v podobě prostorových útvarů, které na metalografickém výbrusu mají tvar protáhlých útvarů tzv. lupínků. Jejich délka je podstatně větší, než tloušťka, konec lupínků je ostrý. Tyto lupínky značně snižují pevnost litiny [5]. Částice grafitu tvoří v základní kovové hmotě vruby, které působí jako místní koncentrátor napětí.

Pro konstrukční účely se používá především litiny podeutektické, které mají (2,8-3,6)% C, (1,4-2,8)% Si, (0,5-1,0)% Mn, (0,2-0,6)% P a max. 0,15 % S.

Na mechanické vlastnosti má nejvýznamnější vliv struktura základní hmoty, tvar, velikost a rozložení grafitu. Pro většinu účelů je požadována LLG

s perlitickou základní hmotou. S menším obsahem perlitu v základní hmotě klesá pevnost a tvrdost litiny.

U litin s lupínkovým grafitem se mez pevnosti v tahu  $R_m$  pohybuje v rozmezí 100 až 350 MPa. Pro mez pevnosti v ohybu platí, že  $R_{m0}$  je  $(1,5 \text{ až } 2)R_m$ . Má prakticky nulovou tažnost, tvářitelnost a rázovou houževnatost. Tvrdost litin s lupínkovým grafitem je 180 až 270 HB. Pevnost v tlaku je asi trojnásobek pevnosti v tahu, mez únavy je  $\sigma_c = 0,3R_m$ . Modul pružnosti  $E$  se obvykle pohybuje v rozmezí  $6 \times 10^4$  až  $16 \times 10^4$  MPa. Nejdůležitější vlastností LLG je velmi dobrá schopnost útlumu vibrací. Použití jako konstrukčního materiálu v případech značného přetížení a rázového namáhání není přípustné. Má velmi dobré slévárenské vlastnosti, dobrou obrobitelnost, výbornou tepelnou vodivost a velmi dobré útlumové vlastnosti.

### 2.2.2 Litina s červíkovým grafitem (LČG, resp. dle ČSN EN - GJV)

Tvar červíkovitého (vermikulárního) grafitu je možno považovat jako přechod mezi grafitem lupínkovým a kuličkovým grafitem [12]. Částice grafitu v této litině jsou náhodně orientované a mají podobný tvar grafitu jako u LLG. Jsou ale kratší, silnější a jejich zakončení není ostré, nýbrž zaoblené [5]. Podle tvaru grafitu se vlastnosti této litiny blíží vlastnostem litiny s lupínkovým nebo kuličkovým grafitem. Červíkovitého grafitu lze dosáhnout modifikací taveniny:

- nedokonalou modifikací Mg, Ce při výrobě LKG (nedosáhne se dokonalé globularizace grafitu);
- kombinací globularizačních a antiglobularizačních prvků (Mg, Ti);
- modifikací směsným kovem.

Chemické složení bývá (3,5-3,8)% C, (2,4-2,7)% Si, 0,6% Mn, max. 0,06% P, max. 0,02 % S. U litin s červíkovým grafitem se mez pevnosti v tahu  $R_m$  pohybuje v rozmezí 320 až 550 MPa. Tyto litiny mají velmi malou tažnost  $A_5 = 0,5 - 4,5$  %. Tvrdost litin s červíkovým grafitem je 130 až 300 HB.

Litiny s červíkovým grafitem mají uplatnění tam, kde je vhodné využít vlastnosti LLG a LKG současně. Mezi příznivé vlastnosti LČG patří tepelná vodivost a dobré útlumové vlastnosti chvění. Tato litina, podobně jako LLG, se

vyznačuje dobrými slévárenskými vlastnostmi: zabíhavost; malý sklon ke stahování; malé smrštění. Podobně jako LKG, vykazuje tato litina dobré mechanické vlastnosti: vyšší pevnost; houževnatost; odolnost proti cyklickému namáhání; vyšší žáruvzdornost.

### **2.2.3 Litina s kuličkovým grafitem (LKG, resp. dle ČSN EN 1563 - GJS )**

Grafitická litina, u níž je po ztuhnutí vyloučen grafit ve tvaru kulových útvarů, se nazývá litina s kuličkovým (globulárním) grafitem.

V současné době litina s kuličkovým grafitem nahrazuje ocelové odlitky, protože má lepší slévatelnost a srovnatelné mechanické vlastnosti.

Tvar grafitu ve formě kuliček zmírňuje vrubový účinek na hranici grafitu a kovové matrice a tím přispívá k vyšší pevnosti této litiny. Kulového tvaru grafitu se docílí modifikováním, tj. zpracováním výchozího tekutého kovu modifikačními přísadami, které obsahují složky ovlivňující krystalizaci grafitu ve fázi růstu krystalu tak, že dochází ke zpomalení růstu grafitu ve směru podélné osy a ke zrychlení růstu ve směru kolmém na osu.

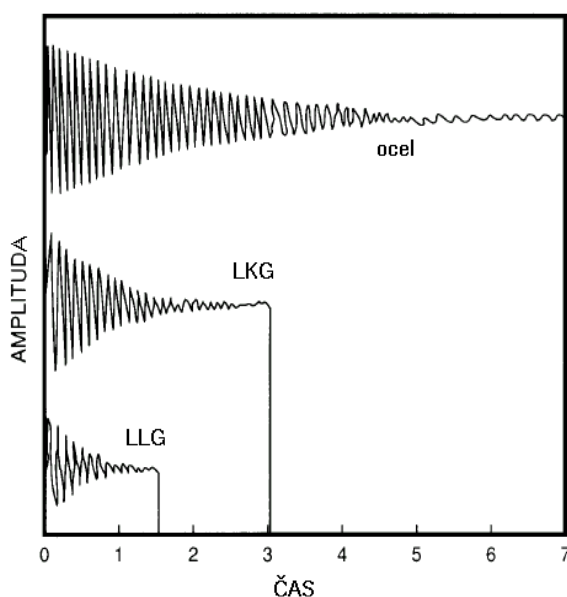
Chemické složení bývá (3,2-4,2)% C, (1,5-4,0)% Si, (0,4-0,8)% Mn, méně než 0,1% P a 0,02 % S. Litina s kuličkovým grafitem bývá většinou eutektická, někdy i nadeutektická.

#### **2.2.3.1 Mechanické vlastnosti LKG**

Litiny s kuličkovým grafitem se vyznačují pevností v tahu 380 - 700 MPa a tvrdostí podle Brinella v celkovém rozmezí 140 – 300 HB [7].

Litina s kuličkovým grafitem může mít matrici perlitickou nebo feritickou. Perlit převládá ve stavu po odlití, tato litina se vyznačuje vyšší pevností v tahu (500 až 700 MPa), menší tažností (3 až 5 %) a tvrdostí 230 až 280 HB.

Podíl feritu lze zvýšit přidáním Si a snížením obsahu Mn. Tato litina s kuličkovým grafitem má nižší pevností v tahu (400 až 500 MPa) a podstatně vyšší tažností (5 až 15 %). Modul pružnosti u této litiny se pohybuje v mezích 160 000 až 180 000 MPa. Schopnost útlumu je menší a vrubová citlivost při únavovém namáhání je větší než u LLG.



Obr. 2.2 Srovnání tlumících vlastností oceli, LKG a LLG [8]

#### 2.2.3.2 Slévárenské vlastnosti LKG

Slévárenské vlastnosti LKG mají velký praktický a teoretický význam při výrobě kvalitních odlitků, protože technologie výroby odlitků z LKG je složitější, než z LLG.

**Zabíhavost LKG** - je velmi dobrá, prakticky stejná jako u LLG, tedy mnohem vyšší než u oceli. Nejlepší zabíhavost má LKG při stupni eutektičnosti:  $S_c = 0,95 - 1,1$ . Při nižším  $S_c$  je zabíhavost horší, avšak vždy lepší než u oceli. Zabíhavost všeobecně závisí na [1]: lící teplotě; chemickém složení slitiny; metalurgickém ošetření taveniny a typu slévárenské formy.

**Smršťování LKG** - má výrazně jiný průběh, než u ostatních druhů litin. Z hlediska objemových změn lze průběh tuhnutí rozdělit do etap: primární smršťování; grafitická expanze; sekundární smršťování.

Z hlediska vnitřní homogenity by se měl grafit vylučovat pokud možno stejnoměrně, aby sekundární stahování bylo co nejmenší. Pro dosažení malého smršťování je nutné zajistit minimální obsah karbidotvorných prvků

(Mn,Cr) a segregujících prvků (P,S) [3]. Dále je třeba modifikaci a očkování provádět tak, aby vznikl jemný grafit, bez podílu karbidotvorných složek. Teplotu přehřívání a udržování kovu nepoužívat běžně vyšší než 1500°C, lze max. až 1520°C a zbytkový obsah hořčíku udržovat na spodní hodnotě ( $Mg_{zbyt} = 0,04 \%$ ).

### 2.3 Vliv přísadových prvků na vlastnosti LKG

Přísadové prvky se dělí na legující, tj. žádoucí, které přidáváme pro zlepšení vlastností výsledného materiálu a na nečistoty, jejichž obsah se snažíme eliminovat.

**Uhlík** - výrazně ovlivňuje strukturu a vlastnosti železa a je přítomen jako intersticiální přísada. V případě vyšší koncentrace uhlíku, než je jeho rozpustnost v tuhém roztoku, tvoří se železem intersticiální chemickou sloučeninu - karbid železa  $Fe_3C$  nebo je chemicky volný a ve struktuře přítomen jako grafit. Ten krystalizuje v šesterečné soustavě. Grafit kompenzuje stahování, ke kterému dochází při tuhnutí odlitku. Čím více uhlíku je vyloučeno jako grafit, tím je celkové stažení litiny při tuhnutí odlitku menší [12]. Tento fakt umožňuje zmenšit velikost nálitků. Při vyšším obsahu uhlík způsobuje zhrubnutí grafitu. Tvrdost a pevnost grafitu jsou nízké. Větší množství uhlíku v litině ve formě grafitu má za následek dobré útlumové vlastnosti litiny.

**Křemík** - je po uhlíku druhou nejdůležitější přísadou v litinách. Je to nekarbidotvorný prvek, který při tuhnutí výrazně podporuje grafitizaci, při eutektoidní přeměně podporuje vznik feritu [5]. Tím snižuje pevnost a tvrdost litiny. Zlepšuje slévárenské vlastnosti, neboť snižuje teplotu tání litiny a zvyšuje tekutost, avšak zvětšuje sklon k tvorbě trhlin. Navíc přítomnost Si zvyšuje pevnost matrice. Přítomnost křemíku v litině posouvá eutektický bod (4,23 % C) k nižšímu obsahu uhlíku. S jeho zvyšujícím se obsahem klesá rozpustnost C v austenitu.

**Mangan** - je karbidotvorná přísada, která zvětšuje stabilitu cementitu a potlačuje tvorbu grafitu, protože má větší afinitu k uhlíku, než Fe. Obsah Mn má tendenci snižovat kritickou teplotu. Významný je vliv manganu při eutektoidní

transformaci. Mangan stabilizuje perlit (zejména u litiny s kuličkovým grafitem), zjemňuje perlit, zvyšuje pevnost, tvrdost a odolnost proti otěru [5].

Jeho nejdůležitější vlastností je, že na sebe váže síru v MnS a tím odlišuje litinu. Při odlévání zvyšuje tekutost a zlepšuje homogenitu odlitku. Jeho přebytek však zvyšuje tvrdost a křehkost litin. Naznačený vliv Mn souvisí zejména s jeho nerovnoměrným rozložením v matrici litiny, neboť se soustřeďuje v průběhu krystalizace ve zbylé tavenině, a proto se po ztuhnutí nachází jeho zvýšená koncentrace v hraničních oblastech eutektika.

**Síra** - podobně jako mangan stabilizuje cementit, zvětšuje smrštění odlitku a zhoršuje jeho homogenitu. Zvyšuje tvrdost a křehkost, způsobuje v litinách lámavost za tepla, a proto se snažíme o její eliminaci. Nepříznivý vliv síry lze kompenzovat její vazbou s manganem na MnS. U litin s kuličkovým grafitem by měl být obsah síry menší, než 0,02 %.

**Fosfor** - stabilizuje cementit, zvětšuje interval krystalizace a zlepšuje tekutost taveniny. Větší obsah fosforu vede ke vzniku fosfidu železa v ternárním fosfidické eutektiku (tzv. Steaditu), který zvyšuje odolnost proti opotřebení, tvrdost a křehkost. Zhoršuje obrobitelnost a snižuje odolnost proti dynamickému namáhání. Snižuje koncentraci uhlíku v eutektickém bodě.

**Hořčík** - podporuje vznik jemného grafitu. Používá se v malém množství jako přísada do litiny s kuličkovým grafitem při modifikaci, v podobě předslutin Ni-Mg, Cu-Mg i Al-Mg, které se vpraví do dostatečně přehřáté taveniny.

**Měď** - za vysokých teplot mírně podporuje grafitizaci a při eutektoidní přeměně stabilizuje perlit, což má za následek zvýšení mechanických vlastností a tvrdostí litiny. Zejména u litiny s kuličkovým grafitem se měď s výhodou kombinuje s chromem, obvykle v poměru Cu:Cr = 4:1, kdy se dosahuje perlitické struktury s jemným grafitem a vysokými mechanickými vlastnostmi [5].



**Dusík** - při vyšším obsahu podporuje vznik nitridů a může být příčinou bublinatosti odlitků. Při malém obsahu působí perlitotvorně, zjemňuje grafit a tím příznivě ovlivňuje mechanické vlastnosti.

**Kyslík** - způsobuje oxidaci v litinách při jejich tavení a odlévání, proto se snažíme jeho obsah snížit.

**Vodík** – je nežádoucí prvek protože, podporuje vznik hrubého grafitu. Při vyšším obsahu zapříčiňuje vznik pórovitosti litiny.

### 2.3.1 Soustava Fe-C-Si

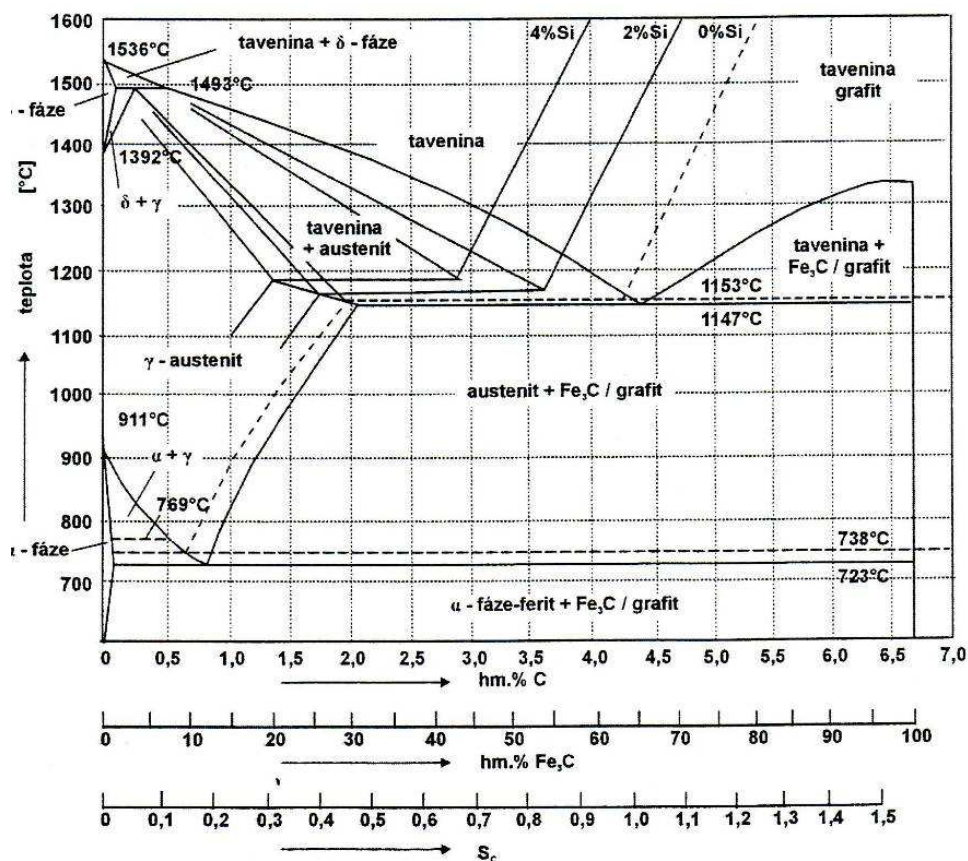
U grafitických litin s obsahem křemíku větším než 2% je nutné sledovat fázové přeměny v ternární soustavě Fe-C-Si.

Komplikovanost soustavy Fe-C-Si spočívá ve skutečnosti, že soustava může být stabilní tak i metastabilní. V metastabilní rovnováze soustavy Fe-Si-C je uhlík přítomen v podobě cementitu  $\text{Fe}_3\text{C}$ , který prakticky neobsahuje žádný křemík [16]. Ve stabilní soustavě Fe-C-Si je uhlík přítomen jako grafit a spolu s feritem jsou rovnovážné fáze za normální teploty.

Křemík je prvek, který má značný vliv na polohu eutektického a eutektoidního bodu litiny, přičemž litiny s vyšším obsahem Si mohou být nadeutektické i při nižším obsahu než 4,23 % C. Pro charakteristiku litin velmi důležitým kritériem je uhlíkový ekvivalent, který lze stanovit:

$$C_E = \%C + 0,3\%Si \quad (1-1)$$

Jak vyplývá ze vztahu pro výpočet uhlíkového ekvivalentu (1-1), tak křemík má trojnásobně větší grafitizační schopnost, než uhlík. Proto pro sledování grafitických litin má velký význam soustava Fe-C-Si. Na obr. 2.3 je znázorněn vliv Si na polohu důležitých bodů a křivek soustavy Fe - C.



Obr. 2.3 Ternární soustava Fe-C-Si [14]

## 2.4 TAVENÍ LITINY S KULIČKOVÝM GRAFITEM

### 2.4.1 Vsázkové suroviny

Pro výrobu litiny s kuličkovým grafitem je nutno používat velmi čisté suroviny s nízkým obsahem nečistot, síry, fosforu a karbidotvorných prvků. Nároky na kvalitu surovin jsou značně přísnější, než pro výrobu litiny s lupínkovým grafitem.

Surové železo - pro výrobu litiny s kuličkovým grafitem se používají vysokopecní surová železa s vyšší čistotou, nebo surová železa vyrobená speciálními rafinačními postupy [5]. Běžné typy surových želez, používaných pro výrobu LLG mají vyšší obsah Mn a P, který zapříčiňuje tvorbu karbidů.

Ocelový odpad - se musí přidávat do vsázky se značnou opatrností, je nutné aby ocelový odpad byl pečlivě tříděn, protože by mohlo dojít k vnášení

škodlivých stopových prvků a plynů do vsázky. U ocelového odpadu je nutno věnovat zvýšenou pozornost přítomnosti manganu a karbidotvorných prvků.

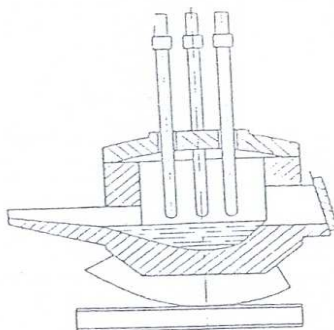
Vratný materiál - je nutno používat ve stejné sortě jako je vyráběná litina. Ve slévárnách, které se zabývají výrobou různých typů litin je nutné, aby do tvárné litiny nebyl přidán jiný vratný materiál. Stejně tak je nutno třídit vratný materiál LKG různých značek, které se liší zejména obsahem karbidotvorných prvků.

Litinový odpad – a též i litinové třísky se vzhledem k nejistému složení obvykle nepoužívají.

#### 2.4.2 Přehled tavících agregátů

Jak z výše uvedeného vyplývá, litina s červíkovým grafitem se hodně podobá litině s kuličkovým grafitem. To platí i o její výrobě. Názory na tavící (primární) zařízení se v různé literatuře liší.

**Elektrické obloukové pece** - tento druh pecí se skládá z nístějové části, víka s chlazenými grafitovými elektrodami a vsázecích dvířek. Tyto pece jsou ve slévárnách litiny spíše výjimečné, většinou jsou v těch slévárnách, které změnilly výrobní program z oceli na litinu. Po roztavení vsázky vyplouvají lehké oxidy a nečistoty na hladinu taveniny a tím brání k další oxidaci taveniny a propalu prvků. Umožňují přesnou rafinaci taveniny s nižším obsahem nečistot a plynů. Tyto pece také nabízejí výborné řízení teploty, operační flexibilitu a spolehlivost. Hlavní nevýhody jsou vysoké udržovací náklady a náklady na žáruvzdornou vyzdívku.



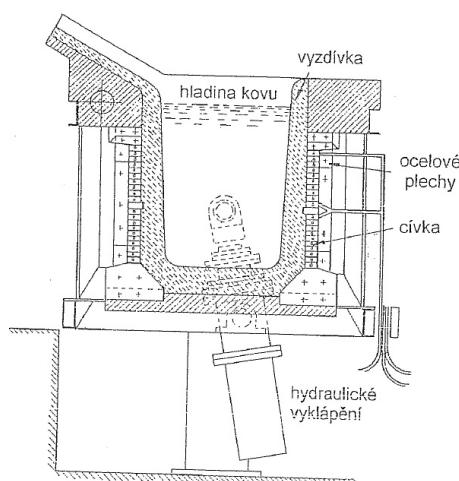
Obr. 2.5 Schéma obloukové pece [5]

**Elektrické indukční pece** - jsou nejčastěji používaným tavicím zařízením pro výrobu litin s kuličkovým grafitem [5]. Příprava taveniny v elektrické indukční peci je čistá, jednoduchá a spolehlivá. V těchto pecích lze velmi přesně a pružně řídit chemické složení vsázky s dobrou regulací teplot tavení, předehřevu a udržování. Také v nich dochází k malému propalu prvků a dokonalé homogenizaci taveniny účinkem vířivých proudů. Mají vysoké provozní náklady na energii proti kuplovnám, vysoké investiční náklady a relativně malý specifický tavicí výkon.

Elektrické indukční pece dělíme podle frekvence:

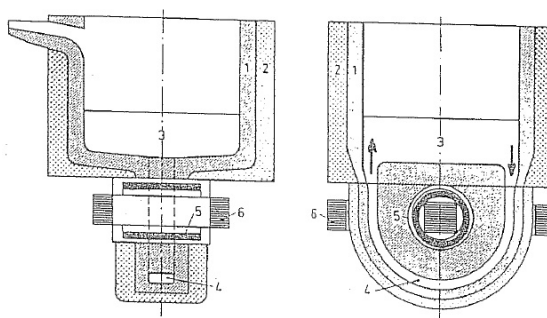
- nízkofrekvenční – síťové (50 Hz);
- středofrekvenční (150 – 500 Hz).

**Elektrické indukční pece kelímkové** - tento druh pecí se skládá z cívky, chlazení, kelímku, vyzdívky a vyklápění a používá se především k tavení litin. Kelímkové pece nabízejí vysokou flexibilitu tavicího procesu, možnost použití levné kovové vsázky, řídit a kontrolovat velmi přesně chod tavení. Pro tyto pece je charakteristické přirozené proudění taveniny v kelímku, které způsobuje homogenizaci taveniny.



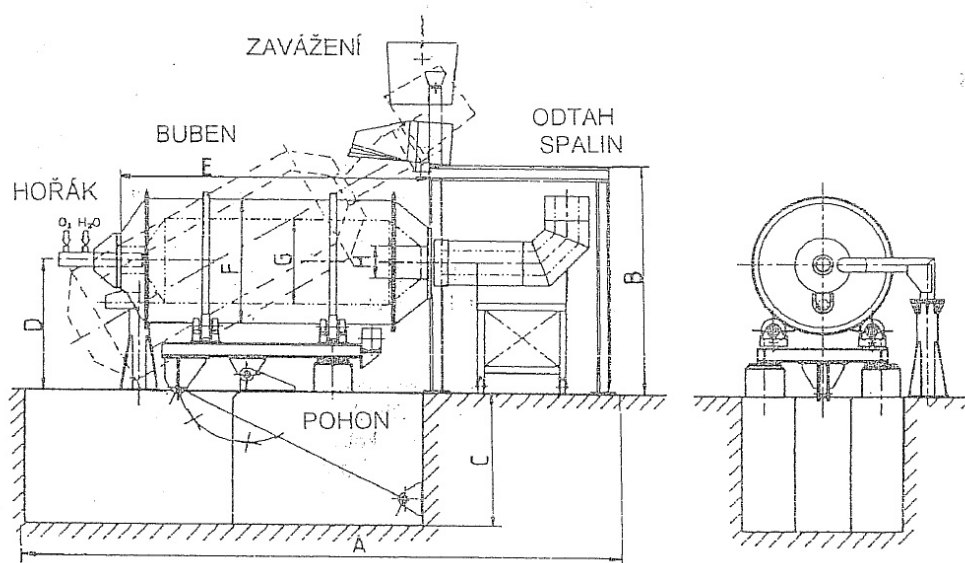
Obr. 2.6 Schéma indukční pece kelímkové [5]

**Elektrické indukční pece kanálkové** - tyto pece se skládají z kanálku ve tvaru U, indukční cívky, vyzdívky, tepelné izolace a magnetického jádra. Pece se pro svůj malý výkon nepoužívají pro tavení, ale pro udržování teploty kovu či případné homogenizaci taveniny nebo dodatečné úpravě chemického složení. Výhodou je možnost ohřevu mimo energetickou špičku a vysoká účinnost. Hlavní nevýhodou těchto pecí je, že musí zůstat vždy určitý zbytkový objem roztaveného kovu. Často se používají pro duplexní tavení, kdy se litina nataví v kuplovně (ekonomický provoz) a v indukční kanálkové peci se upraví chemické složení.



Obr. 2.7 Schéma indukční pece kanálkové [5]

**Rotační bubnové pece** - lze je použít pro tavení všech druhů litin i řady neželezných kovů. Tyto pece jsou tvořeny válcovou částí, která má na každém konci konická čela. V jednom je hořák a ve druhém je vsázeční otvor a odtah spalin. Většinou využívají energii v podobě spalování zemního plynu a jsou vybaveny dokonalým řízením. Tavení v rotačních pecích je velmi rychlé a s malou spotřebou paliva, protože tepelná účinnost je u rotačních bubnových pecí nejvyšší ze všech tavících agregátů, přičemž tepelné ztráty sáláním jsou minimální. Navíc tyto pece mají vyhovující emisní limity. Atmosféra působí na taveninu oxidačně, což vede ke ztrátám uhlíku, který se musí dodávat nahličovadlem do vsázky. Hlavní výhodou těchto pecí jsou nízké investiční a provozní náklady.



Obr. 2.5 Schéma rotační bubnové pece [5]

## 2.5 KRYSTALIZACE LITIN

Krystalizací rozumíme přechod z tekutého do pevného skupenství za vzniku krystalů, který je nedílnou součástí mimopecního zpracování litiny.

Tuhnutí litin probíhá ve dvou různých soustavách (krystalizace primární fáze a krystalizace eutektika). Každý z těchto krystalizačních dějů je zahájen nukleací příslušné fáze a jejím následným růstem [5].

**Nukleace zárodků** - je tvoření stabilních zárodků, na nichž může pokračovat růst nové fáze. Při dostatečném přechlazení dochází k nukleaci vlastních stabilních zárodků - homogenní nukleace. V případě, že dochází k nukleaci na zárodcích cizích - heterogenní nukleace. Většinou dochází k nukleaci heterogenní, protože homogenní nukleace je jev velmi energeticky náročný a může k ní docházet pouze při velkém přechlazení.

**Růst zárodků** - je druhým stadiem procesu tuhnutí. Dochází k transportu atomů z tekuté do tuhé fáze přes mezifázové rozhraní.

Rozlišují se dva druhy rozhraní mezi tuhou a tekutou fází:

*Atomicky hladké rozhraní* - u tohoto typu rozhraní vznikají vrstvy složek fáze s vysokou entropií, které jsou energeticky náročné, protože pro vytvoření další vrstvy je nutný nový proces nukleace. Takto převážně krystalizuje grafit.

*Atomicky hrubé rozhraní* - u tohoto typu rozhraní vzniká fáze při menším přechlazení, protože složky mají nízkou entropii. Takto převážně krystalizuje austenit.

**Vznik primárního austenitu** - jako zárodky mohou sloužit částice formovací směsi a oxidy, karbidy nebo nitridy prvků přítomných v litině [5]. Titan a vanad podporují nukleaci dendritů. Rychlost ochlazování, segregace a difúze prvků určují růst dendritů. Čím je rychlost ochlazování větší, tím je menší poloměr zaoblení (špičatější vrchol dendritu) a jemnozrnnější struktura.

**Krystalizace eutektika** - pod rovnovážnou eutektickou teplotou v koncentrační oblasti dochází ke krystalizaci eutektika. Tato oblast se nazývá oblast kooperativního růstu eutektika. Oblast kooperativního růstu eutektika je definována jako rozmezí teplot a koncentrací, v němž je v binárním systému možný společný stabilní růst dvou eutektických fází stejnou rychlostí [5].

U slitiny Fe-C jsou teploty tuhnutí obou složek značně rozdílné a proto je tvar oblasti kooperativního růstu eutektika asymetrický a posunut směrem ke složce s vyšší teplotou tuhnutí. U litiny s kuličkovým grafitem roste grafit menší rychlostí než austenit. Obě rychlosti růstu austenitu a grafitu nemají společný průsečík, proto nemůžou obě fáze růst společně. Kolem grafitu je vytvořena obálka v důsledku rychlejšího růstu austenitu. Přes obálku austenitu dochází k difúzi uhlíku, která zapříčiňuje další růst grafitových částic. U litin se tvoří tzv. anomální eutektikum, které je zapříčiněno odlišnými mřížkami grafitu a železa. Vedoucí složkou eutektické krystalizace je grafit, protože má vyšší teplotu tuhnutí.

**Nukleace grafitu** - je základním aspektem ovlivňujícím krystalizaci grafitických litin. Grafit by měl být vyloučen v celém průřezu odlitku rovnoměrně a pokud možno ve stejně velkých útvarech. Při nevhodném rozložení grafitických zárodků vznikají nežádoucí typy grafitických částic, které mají negativní vliv na kvalitu litiny.

Grafitizační zárodky musí splňovat tyto požadavky [5]:

- a) Při teplotě tuhnutí litiny jsou v tuhém stavu a v tavenině jsou nerozpustné.
- b) Mají mikroskopickou velikost (obvykle kolem 1  $\mu\text{m}$  a menší), pokud možno se neshlukují, nevyploouvají a v tavenině jsou velmi rovnoměrně rozložené.
- c) Krystalizační účinek působí na žádoucí fázi (grafit, nikoliv cementit). K tomu je nutné, aby krystalická mřížka zárodku byla stejného typu jako u grafitu.

### **Růst eutektika s kuličkovým grafitem**

Po modifikaci litiny globulizačními prvky dochází k růstu kuličkového grafitu. Jako modifikační prvek se používá hořčík, případně společně s cerem a dalšími kovy vzácných zemin.

Kyslík a síru na sebe chemicky váží globulizační prvky, protože k těmto prvkům mají vysokou afinitu. Při nižším obsahu O a S způsobí tyto prvky zvýšení povrchového napětí a tím dojde ke zhoršení podmínek pro růst grafitu. Růst grafitu probíhá difúzí uhlíku přes obálku austenitu. Částice grafitu je uzavřena v obálce austenitu z důvodu vyšší rychlosti růstu austenitu. V důsledku koncentračního spádu v austenitové obálce při ochlazení pod rovnovážnou eutektickou teplotou dochází k difúzi uhlíku a dalšímu růstu grafitu.

## **2.6 MODIFIKACE A OČKOVÁNÍ**

### **2.6.1 Modifikace**

Modifikací rozumíme záměrné ovlivňování tvaru grafitu, pomocí modifikačního činidla (modifikátoru). Modifikátor je povrchově aktivní látka, která ovlivňuje směr a rychlost růstu grafitu. V praxi se nejčastěji používá hořčík nebo cér. Při použití hořčíku je nutné, aby tavenina obsahovala maximálně cca 0,02 % síry.

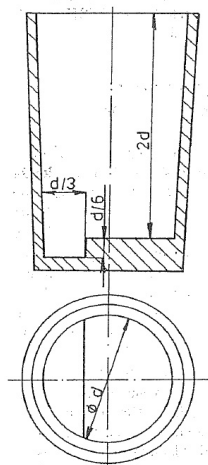


Teorie objasňující mechanismus modifikace lze shrnout do těchto základních názorů [14]:

- při modifikaci dochází k vypařování Mg, který se dostává do atomárního stavu a absorbuje se na plochách stávajícího krystalu grafitu, čímž mění rychlost růstu krystalových ploch
- při modifikaci probíhá desoxidace, odsíření, odplynění taveniny – její rafinaci a tím dochází ke změně fyzikálních vlastností taveniny a ovlivnění růstu grafitu
- při modifikaci se mění podmínky grafitizace

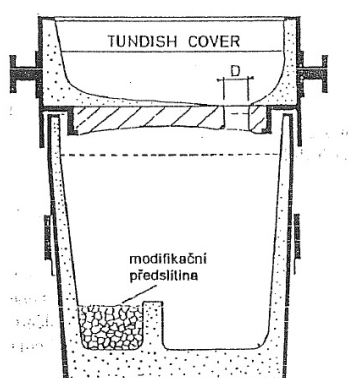
Metody modifikace litiny s kuličkovým grafitem lze rozdělit na polévací a ponořovací [12]:

- a) metoda Sandwich – modifikace se provádí ve speciální otevřené licí pánvi, která je předehřátá na teplotu cca 600°C. Používá se pánve kde je výška 2 až 3 násobek horního průměru. Ve spodní části se nachází komůrka s výstupkem, nebo může být prostor dna rozdělen příčkou. Do této komůrky se vloží modifikátor Mg, vrstva očkovadla - např. FeSi75 a tento obsah se zakryje ocelovými odstřížky. Vrstva ocelových odstřížku oddaluje začátek modifikační reakce.



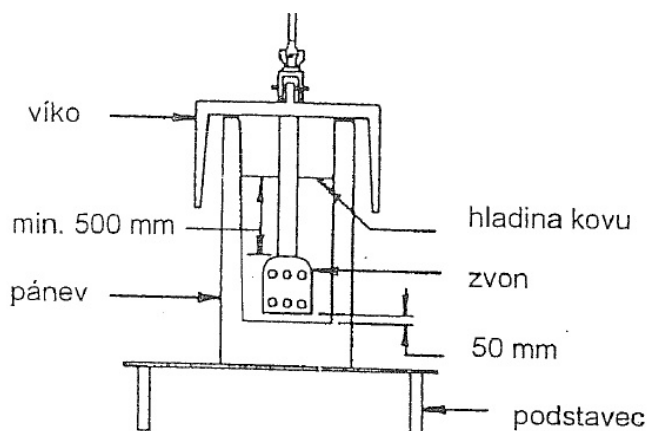
Obr. 2.9 Schéma metody Sandwich [5]

- b) metoda TUNDISH (Tundish cover) – tavenina se vlévá do speciální lící pánve, která je opatřena víkem s otvorem. V pánvi se nachází podobně jako u metody SANDWICH komůrka, nebo je dno rozděleno příčkou, do které se vloží předslitina. Víko s pánví by mělo být pevně spojeno, aby nedošlo k jeho odklopení vlivem přetlaku plynů v pánvi. U této metody je menší ztráta Mg, protože víko brání přístupu kyslíku z okolí. Další výhodou víka je zabránění rozstříku kovu, snížení teplotní ztráty a snížení množství plynu v tavenině.



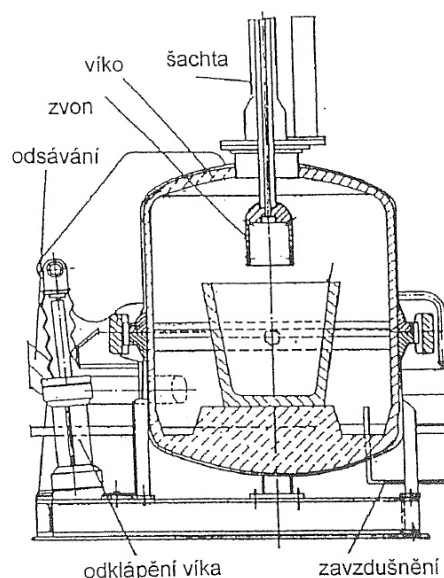
Obr. 2.10 Schéma metody Tundish [5]

- c) modifikace ponorným zvonem – je to jedna z nejstarších ponorných metod modifikace. Princip této metody spočívá v ponoření zvonu s předslutinou do taveniny. Podobně jako u metody TUNDISH víko brání rozstříku Mg a přístupu okolního kyslíku.



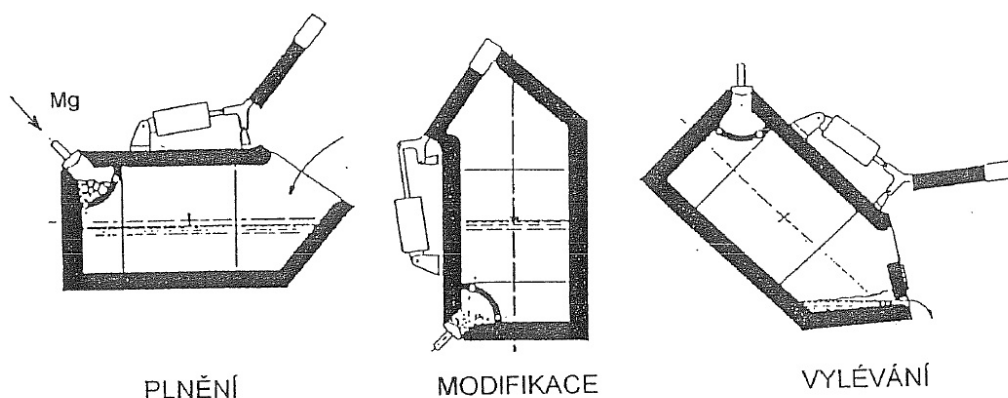
Obr. 2.11 Schéma metody modifikace ponorným zvonem [5]

d) modifikace v autoklávu – tato metoda je založena na podobném principu jako metoda ponorným zvonem. Rozdíl je v tom, že pánev s taveninou je zavezena do autoklávu, kde se zvýší tlak na hodnotu 0,4 až 1,0 MPa. Po zvýšení tlaku se zvon s modifikátorem ponoří do taveniny. Zvýšený tlak zapříčiní pomalejší vypařování hořčíku, než při atmosférickém tlaku. Při této metodě lze použít modifikátor s vyšším obsahem hořčíku.



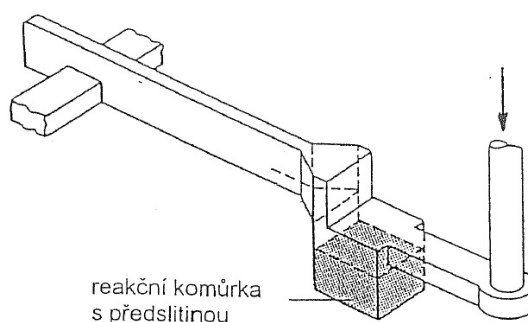
Obr. 2.12 Schéma metody modifikace v autoklávu [5]

e) modifikace v konvertoru – konvertor je speciální zařízení, který lze naklápět do různých poloh a je opatřen víkem. Součástí konvertoru je speciální komůrka, která slouží k vkládání modifikátoru. Komůrka je oddělena od zbytku konvertoru grafitovou deskou s otvory. Během plnění konvertoru taveninou je komůrka s modifikátorem mimo její dosah. Po sklopení konvertoru se komůrka zalije taveninou a dojde k modifikaci. V této poloze je konvertor přiklopen víkem, které brání rozstříku taveniny. Díky otvorům v grafitové desce probíhá modifikační reakce poklidně. Po dokončení modifikace se tavenina přelije do odlévací pánve.



Obr. 2.13 Schéma metody modifikace v konvertoru [5]

- f) modifikace plněným profilem – tato metoda je založena na ponořování modifikačního drátu do taveniny. Je to vlastně dutý drát, ve kterém je modifikační předslitina. Proces modifikace je řízen pomocí rychlosti podavače plněného profilu. Výhodou této metody je veliká operativnost, možnost dodatečné modifikace a použití v libovolné lící pánvi. Nevýhodou je vysoká cena zařízení a modifikačního drátu.
- g) metoda in mould – tato metoda spočívá v modifikaci přímo ve formě. Do slévárenské formy se zaformuje komůrka, která je spojena s vtokovou soustavou do které se vloží modifikační předslitina.



Obr. 2.14 Schéma metody modifikace in mould [5]

#### 2.6.1.1 Modifikace Mg

Teplota vypařování Mg je 1107°C. Při teplotách zpracování litiny 1400 až 1500°C je tlak jeho par až 1,0 MPa [12]. Modifikace probíhá postupným rozpouštěním hořčíkových par, které probublávají roztavenou litinou. Dráha hořčíkových bublin by měla být co nejdelší, aby vyplouvání bublin bylo pomalé a klidné [5]. Při modifikaci působí hořčík jako odsiřovadlo a desoxidovadlo.

Modifikace se provádí přímo kovovým Mg nebo předslitinami Mg. Při modifikaci kovovým Mg je nutno brát v úvahu vyšší sklon litiny k tvorbě karbidů a proto se musí více očkovat. Reakce je velmi bouřlivá s velkou ztrátou Mg a spojená s rozstřikováním roztaveného kovu. Při použití předslitin hořčíku reakce probíhá pomaleji. Snižuje se oxidace hořčíku na hladině a využití hořčíku je poměrně vysoké (50 – 70 %).

#### 2.6.1.2 Modifikace kovy vzácných zemin

Kovy vzácných zemin (KVZ) jsou kovy s vysokou elektrickou vodivostí a vysokým leskem. KVZ jsou silnými redukčními činidly a jejich sloučeniny jsou obecně vázány iontovou vazbou. Většina KVZ je trojmocných. Nejreaktivnějšími kovy z KVZ jsou europium a céry. KVZ na vzduchu velmi rychle reagují s kyslíkem za vzniku oxidů. Za zvýšených teplot u některých může dojít k samovznícení a intenzivnímu hoření. Promethium a thorium jsou radioaktivní. Modifikace KVZ je dražší než modifikace Mg. V tabulce 2.2 jsou uvedeny některé fyzikální a chemické vlastnosti KVZ.

Výhodou KVZ je, že teplota varu je vyšší než teploty při modifikaci litiny. Z toho plyne, že průběh reakce je klidný a zpracování nevyžaduje speciální postupy a zařízení.

Tab. 2.1 Fyzikální a chemické vlastnosti některých KVZ [8]

Prvek	Značka	Atomové číslo	Atomová hmotnost	Hustota [kg/dm <sup>3</sup> ]	Teplota tání [°C]	Teplota varu [°C]
Lanthanum	La	57	138,90	6,15	918	3464
Cerium	Ce	58	140,12	6,77	789	3443
Praseodymium	Pr	59	140,98	6,44	931	3520
Neodymium	Nd	60	144,24	7,01	1021	3074
Promethium	Pm	61	145,00	7,26	1042	3000
Samarium	Sm	62	150,40	7,52	1074	1794
Europium	Eu	63	151,96	5,20	822	1527
Gadolinium	Gd	64	157,25	7,90	1313	3273
Terbium	Tb	65	158,93	8,23	1356	3230
Dysprosium	Dy	66	162,50	8,55	1412	2567
Holmium	Ho	67	164,93	8,80	1474	2700
Erbium	Er	68	167,26	9,10	1529	2868
Thulium	Tm	69	168,93	9,34	1545	1950
Ytterbium	Yb	70	173,04	7,00	819	1196
Lutetium	Lu	71	174,97	9,84	1663	3402
Scandium	Sc	21	44,96	3,00	1541	2836
Yttrium	Y	39	88,91	4,47	1522	3338
Thorium	Th	90	232,04	11,80	1750	4850

### 2.6.2 Očkování

Z důvodu, že prvky používané k modifikaci grafitu u LKG podporují tvorbu karbidů, je nutné provádět grafitizační očkování. Očkování je v podstatě přidání cizích zárodků do taveniny, ze kterých roste pevná fáze během tuhnutí. V některých případech tyto zárodky vzniknou přidáním drobných částic stejné fáze, která tuhne. Tyto drobné částice se během tavení zcela nerozpustí a poskytují vhodná místa pro růst zrna. V jiných případech mohou stejným způsobem působit částice jiného materiálu, než který tuhne [3].

Očkováním se převážně zlepšují mechanické vlastnosti výsledné litiny, snižuje se riziko vzniku zákalky především u tenkostěnných odlitků. Očkovací účinek se s přibývajícím časem rapidně snižuje. Očkování je posledním krokem v procesu přípravy taveniny LKG před vlastním odléváním do forem.

Pro očkovaní litin s kuličkovým grafitem se používá převážně FeSi s obsahem Si 60 – 75 % [5]. Množství očkovačla závisí na tloušťce stěn odlitku. Pro silnostěnné odlitky se používá méně očkovačla.

Očkovačlo může obsahovat C, Ba, Mg, Mn a Zr, které slouží pro zvýšení rozpustnosti nebo účinnosti očkovačla.

Důležitý je též způsob skladování těchto materiálů. Očkovačla by měla být skladována v uzavřených nádobách, aby byla chráněna před přístupem vzduchu a vlhkostí. Při jednostupňovém očkovaní se očkovačlo přidává k modifikátoru. Množství očkovačla musí být poměrně vysoké, protože interval mezi očkováním a litím je dlouhý. Při dvojstupňovém očkovaní se doočkává až po modifikaci. Tento způsob očkování lze použít u všech druhů modifikace. Očkuje se těsně před litím. Čím později se očkuje, tím je nižší množství očkovačla, protože je vyšší očkovací účinek.

Na očkování po modifikaci taveniny se používají tři metody:

- 1) očkování v pánvi;
- 2) v proudu taveniny během lití;
- 3) ve slévárenské formě.

### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

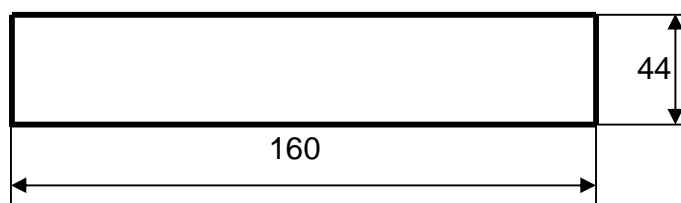
Experimenty prováděné v rámci této práce byly zaměřeny na stanovení metalurgických podmínek při výrobě odlitků jednoduchých tvarů z litiny s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku.

Pro tento účel byly použity zkušební odlitky (destičky) s rozdílnou tloušťkou, odlévané do formy z bentonitové formovací směsi a Y-blok. Součástí práce byl návrh metodiky provádění experimentů, který v sobě zohledňoval vhodnou přípravu taveniny litiny s kuličkovým grafitem (stanovit správné množství vsázkových surovin, modifikátoru, očkovačla a teplotu taveniny). Jako výsledek experimentů sloužila souvislost mezi metalurgickou přípravou taveniny, výslednou mikrostrukturou a mechanickými vlastnostmi odlitků (tvrdoostí zkušebních odlitků a meze pevnosti v tahu).

#### 3.1 POPIS PŘÍPRAVY SLÉVÁRENSKÝCH FOREM

##### 3.1.1 Odlitek pro zkoumání vhodné struktury LKG

Pro zjišťování struktury odlitků z LKG byly použity odlitky ve tvaru obdélníkových destiček s rozdílnou tloušťkou. Tloušťky zkušebních těles byly navrženy: 3, 4, 5, 8 a 10 mm - viz obr. 3.1.



Obr. 3.1 Základní tvar zkušebních těles

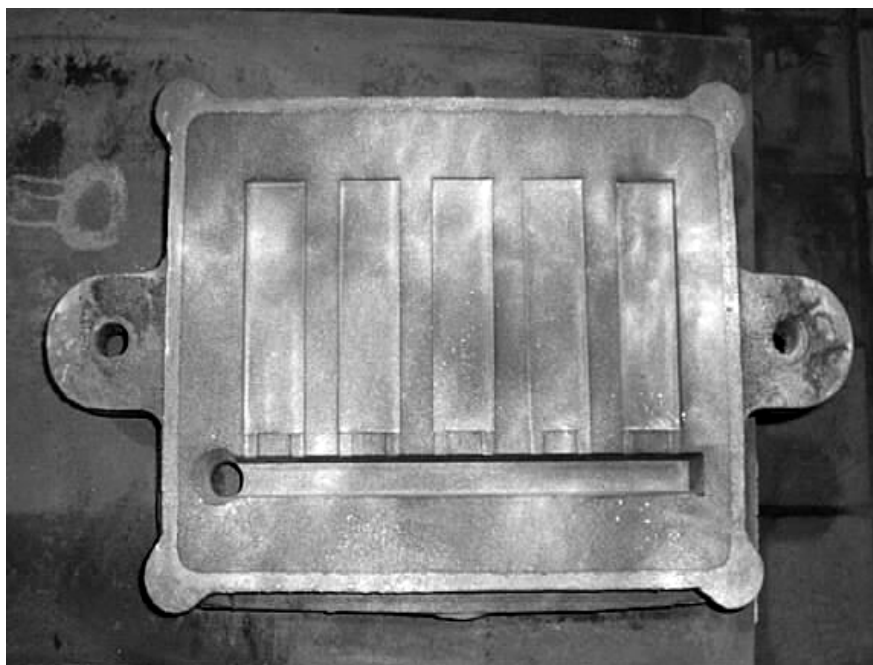
Těchto pět odlitků (zkušebních vzorků) bylo připojeno čelní plochou k jednomu struskováku, aby byl využit prostor v rámu, jak je patrné z obr. 3.2. (Pohled na dělicí plochu vrchní části slévárenské formy). Nejblíže k vtokovému



kůlu byla destička o tloušťce 10 mm a po ní následovaly destičky o tloušťkách 3, 4, 5 a 8 mm.

Písková bentonitová forma byla zhotovena pomocí hliníkového modelu. Tento model sloužil pro zhotovení dutin pro destičky a vtoková soustavy. Licí jamka byla udělána dodatečně po otočení modelu i s rámem formy.

S ohledem na velikost odlitku byl použit rám o rozměrech 400 x 300 x 100 mm. Pohled na zaformovanou vrchní část rámu je patrný z obr. 3.2. Spodní část rámu byla zarovnána formovací směsí a tvořila pouze spodní plochu odlitků. Před složením rámu byl líc formy postříkán vodným roztokem melasy.



Obr. 3.2 Pohled na dělicí plochu vrchní části slévárenské formy

Jak už bylo zmíněno, byla použita běžná bentonitová formovací směs. Jako ostřivo byl použit křemičitý písek Střeleč T2S. Pojivem byl bentonit Speciál 550 (7 hmot. %). Jako přísada byla použita kamenouhelná moučka (4 hmot. %). Formovací směs obsahovala cca 3 % vody.



Obr. 3.3 Slévárenská forma připravená k odlévání

## 3.2 PŘÍPRAVA TAVENINY LKG

### 3.2.1 Tavící zařízení a vsázkový materiál

Na oddělení strojírenské metalurgie Katedry strojírenské technologie TU v Liberci byla připravena tavenina. Pro tavení byla použita elektrická středofrekvenční kelímková indukční pec IO 40 s maximální hmotností nataveného materiálu 40 kg. Pec byla vyzděna kyselou vyzdívkou s obchodním názvem Calderys SILICA MIX 7A. Byla použita pánev s modifikační komůrkou, která měla výšku dvojnásobnou průměru pánve. Pánev byla vyzděna kyselou vyzdívkou ACYKUP.

Pro tavby byl použit tento vsázkový materiál:

- surové železo SOREL - chemické složení surového železa je v tabulce 3.1.
- vratný materiál ze slévárny TUL a z Komerční slévárny šedé a tvárné litiny v Turnově - viz tab. 3.2.
- jako grafitizační očkovač bylo použito Superseed a FeSi75. Chemické složení očkovačů je v tabulce 3.3.
- jako modifikační činidlo byla použita předslitina KVZ Cer-Mischmetall (C-MM), chemické složení obsahuje tabulka 3.4 a MgFeSi, jehož chemické složení je v tab. 3.5.

Tab. 3.1 Chemické složení surového železa (SOREL)

Fe [%]	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Ni [%]
95,48	4,23	0,15	0,013	0,026	0,01	0,007

Tab. 3.2 Chemické složení vratného materiálu Turnov

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cu [%]
3,80	2,18	0,264	0,023	0,011	0,05

Tab. 3.3 Chemické složení očkovačů

	Fe [%]	Si [%]	Al [%]	Ca [%]	Sr [%]	Mg [%]	KVZ
FeSi 75	25	75	-	-	-	-	-
Superseed	Zbytek	75	max. 0,5	0,1	0,8	-	-

Tab. 3.4 Chemické složení modifikátoru Cer-Mischmetall

Ce [%]	La [%]	Nd [%]	Pr [%]	Ost. KVZ [%]	Fe [%]	Si [%]	Mg [%]	Al [%]
50-53	20-26	15-19	4-7	cca 3	cca 0,5	cca 0,3	Cca 0,3	cca 0,2

Tab. 3.5 Chemické složení modifikátoru MgFeSi

Si [%]	Mg [%]	Ca [%]	KVZ [%]	Al [%]	Fe [%]
45	5	1	1	1	47

### 3.2.2 Vzorky pro zjišťování chemického složení

Vzorky pro zjišťování chemického složení LKG byly (o průměru 35 mm a tloušťky 5 mm) s přetoky - tzv. medaile. Odlity byly do přehřáté měděné kokilky, která zajistila velmi rychlé ztuhnutí odlitku. Požadovaná struktura byla ledeburit, resp.  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Chemické složení litiny bylo určeno pomocí spektrálního kvantometru, který analyzuje množství uhlíku pouze z  $\text{Fe}_3\text{C}$ .

## 3.3 VLASTNÍ PROVÁDĚNÍ EXPERIMENTU

Hlavním záměrem těchto experimentů bylo prověřit další možnosti kombinace různých poměrů kovových vsázkových surovin v kombinaci s různými modifikátory a očkovačy.

### 3.3.1 Provádění taveb LKG

Pro dosažení co největší objektivnosti byl pro všechny tavby použit podobný postup tavení, modifikace i grafitizačního očkování. V peci bylo nataveno příslušné množství základního kovového materiálu. Jak je patrné z tab. 3.1 srovnání obsahuje málo křemíku pro výrobu LKG, proto byl obsah Si zvýšen

přidáním příslušného množství FeSi75 - viz tab. 3.6. Potom následovalo roztavení vsázky a zahřátí na teplotu 1500 až 1520°C. Teplota taveniny byla měřena před následujícími kroky pomocí optického pyrometru. Lící pánev byla ohřátá na teplotu cca 800°C. Tato pánev byla současně pánví modifikační a očkovací. Nejdříve bylo do komůrky modifikační pánve vloženo odpovídající množství modifikátoru - viz tab. 3.7 a na toto množství modifikátoru byla přidána příslušná dávka očkovačla FeSi75. Zbytek komůrky byl vyplněn litinovou drtí, která byla ještě přikryta feritickým plechem. Před vylitím taveniny z pece byla odstraněna struska. Poté byla všechna tavenina vlita do pánve a po proběhnutí modifikační reakce byla připravená tavenina doočkována Superssedem a okamžitě odlévána do výše popsaných forem. Po ztuhnutí a zchlazení byly odlitky vytlučeny z formy a od vtokové soustavy odděleny jednotlivé zkušební vzorky.

Na obr. 3.5 je znázorněn pohled na surový odlitek, který je tvořený destičkami výše uvedených tloušťek.

Tab. 3.6 Hmotnostní složení použitých vsázek pro odlévání zkušebních odlitků z LKG

Tavba	Sorel [kg]	Vrat Turnov [kg]	Vrat TUL [kg]	FeSi75 [kg]
PT 01	6,5	20,3	-	0,25
PT 02	34,1	-	-	1,45
PT 03	15,18	-	16,15	0,2
PT 04	7,41	15,29	6,06	0,07

Tab. 3.7 Hmotnostní složení použitého očkovačla a modifikátoru

Tavba	Očkovačlo [kg]		Modifikátor [kg]	
	FeSi75	Superseed	MgFeSi	KVZ
PT 01	0,153	0,102	0,457	0,0047
PT 02	0,200	0,140	0,429	0,0043
PT 03	0,180	0,120	0,490	0,0046
PT 04	0,170	0,110	0,515	0,0045



Obr. 3.5 Odlitky tvaru desek (160 x 44mm; tl. 3, 4, 5, 8 a 10 mm) z LKG

### 3.4 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ

#### 3.4.1 Stanovení chemického složení jednotlivých taveb LKG

Pro zjištění chemického složení byly odlity vzorky („medaile“). Spektrální analýza byla provedena na přístroji LECO v Komerční slévárně šedé a tvárné litiny v Turnově. V tab. 3.8 je uvedeno zjištěné chemické složení taveb LKG.

Tab. 3.8 Chemické složení destiček

CHEMICKÉ SLOŽENÍ [%]											
TAVBA	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
PT 01	3,47	3,90	0,144	0,029	0,012	0,043	0,015	0,010	0,002	0,036	0,021
PT 02	3,85	3,98	0,032	0,031	0,007	0,099	0,010	0,013	0,001	0,142	0,023
PT 03	3,74	1,71	0,350	0,117	0,036	0,002	0,002	0,019	0,002	0,026	0,003
PT 04	3,27	3,40	0,238	0,030	0,016	0,066	0,017	0,013	0,003	0,038	0,050

### 3.4.2 Měření tvrdosti odlitků

Měření tvrdosti bylo provedeno na destičkách a na spodní části Y-bloku. Před měřením tvrdosti byl každý vzorek broušen na měřené ploše tak, aby byla odstraněna licí kůra a povrch měl vyhovující drsnost pro měření, resp. vyhodnocování průměrů vtisků.

Vlastní příprava vzorků pro měření tvrdosti byla prováděna na vodorovné brusce s magnetickým upínačem za stálého chlazení vodní emulzí.

Tvrdost odlitků z LKG byla měřena pomocí Brinellova tvrdoměru firmy Karl Zeiss. Pro měření byla použita kulička  $\varnothing 5$  mm ze zakalené chromové oceli a zatížena silou 7355 N (750 kp). Ze získaných vtisků příslušných plošek byly naměřeny dva na sebe kolmé průměry těchto vtisků. Z těchto dvou hodnot příslušejících ke každému vtisku byla vypočítána střední hodnota průměru vtisku. Ke každé střední hodnotě vtisku byla pomocí tabulek přiřazena výsledná hodnota tvrdosti. Naměřené hodnoty tvrdostí byly statisticky vyhodnoceny podle následujících vztahů:

a) Výběrový aritmetický průměr:

$$x = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (3-1)$$

b) Směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - x)^2} \quad (3-2)$$

V tabulce 3.9 a 3.10 jsou uvedeny naměřené hodnoty tvrdosti zkušebních odlitků a současně jsou tam zapsány i hodnoty výběrového aritmetického průměru a směrodatné odchylky, které byly vypočítány dle vztahů (3-1) a (3-2)

Tab. 3.9 Naměřené hodnoty tvrdosti destiček a vypočítané hodnoty aritmetického průměru a směrodatné odchylky

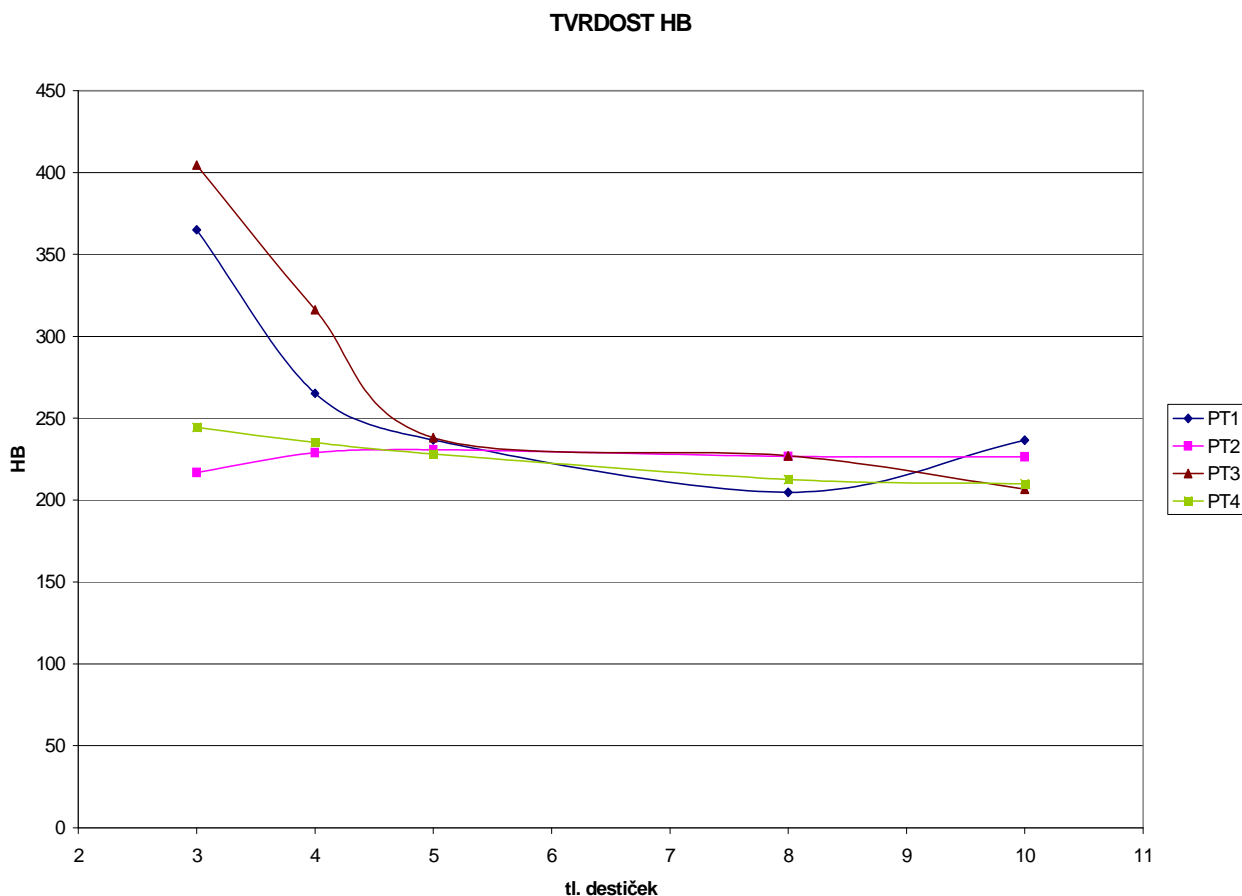
TAVBA	Tloušťka destičky [mm]	TVRDOST HB						Aritmer. průměr tvrdosti	Směr. odchylka tvrdosti
		u vtoku			naproti vtoku				
PT 01	3	373	341	337	373	378	388	365	19,1
	4	255	229	241	298	272	296	265	26,0
	5	222	215	229	239	260	255	237	16,5
	8	213	217	214	323	22	240	205	90,3
	10	313	219	215	226	222	224	237	34,4
PT 02	3	219	226	210	207	226	213	217	7,4
	4	229	227	224	230	228	236	229	3,7
	5	226	229	228	240	234	228	231	4,8
	8	224	228	222	227	235	224	227	4,2
	10	226	226	220	231	230	225	226	3,6
PT 03	3	254	285	278	517	538	555	405	133,0
	4	207	215	224	415	383	453	316	103,0
	5	204	213	211	285	241	275	238	31,9
	8	209	211	204	239	255	244	227	19,7
	10	197	195	196	217	217	218	207	10,7
PT 04	3	215	224	229	260	266	272	244	22,3
	4	207	209	208	269	263	255	235	27,5
	5	211	217	207	252	243	239	228	17,2
	8	200	202	195	228	226	225	213	13,9
	10	207	202	204	213	219	215	210	6,1

Na obr. 3.6 je znázorněno grafické vyjádření závislosti tvrdosti na tloušťce destiček.

Tab. 3.10 Naměřené hodnoty tvrdosti Y-bloku a vypočítané hodnoty aritmetického průměru a směrodatné odchylky

TAVBA	TVRDOST HB						Aritmer. prům. tvrdosti	Směr.odchl. tvrdosti
PT01Y	228	220	228	221	223	218	223	3,8
PT02Y	231	236	229	244	229	231	233	5,3
PT03Y	150	152	157	160	158	156	156	3,5
PT04Y	213	207	202	204	202	209	206	4,0





Obr. 3.6 Závislost tvrdosti na tloušťce destiček

### 3.4.3 Stanovení mikrostruktury

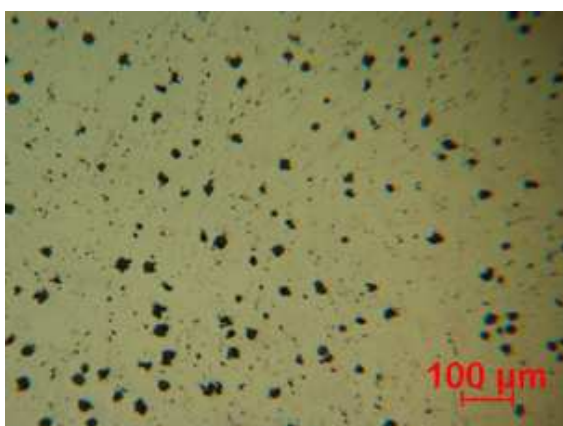
Mikrostruktura byla stanovena z destiček a ze spodní strany Y-bloku. Příprava vzorků se skládala z oddělení vzorků pomocí rámové pily za stálého chlazení z důvodu minimálního ovlivnění struktury. Následně byly vzorky zality do dentakrylu. Po jeho ztvrdnutí následovalo broušení vzorků pod vodou papíry různé zrnitosti a leštění.

K stanovení mikrostruktury odlitků z LKG byl použit světelný mikroskop NEOPHOT 21 (Carl Zeiss Jena).

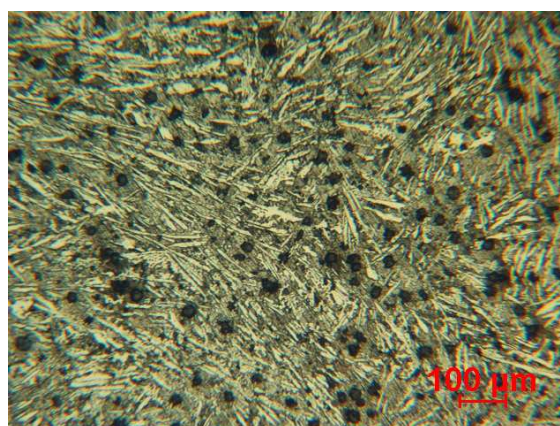
Výsledná struktura byla nejdříve sledována v neleptaném stavu při 100 násobném zvětšení, které sloužilo ke stanovení tvaru, velikosti a rozložení grafitu.

Vzorky pro pozorování a vyhodnocení základní kovové hmoty byly sledovány v leptaném stavu při zvětšení 100 násobném. K naleptání byl použit 3 % roztok leptadla NITAL. Pro kompletní vyhodnocení struktur byla použita norma ČSN 42 0461.

K dokumentaci a vyhodnocení sledovaných struktur byla na mikroskop NEOPHOT 21 připojena digitální kamera a PC s programem Lucia. Vybrané struktury destiček jsou uvedeny na obr. 3.7 – 3.27 a struktury Y bloku jsou uvedeny na obr. 3.28 – 3.31.

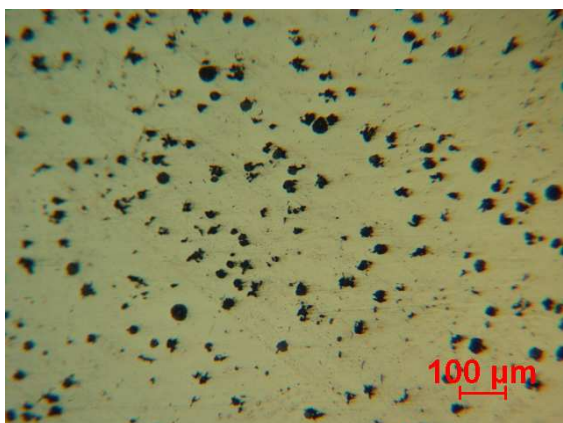


neleptáno 100x

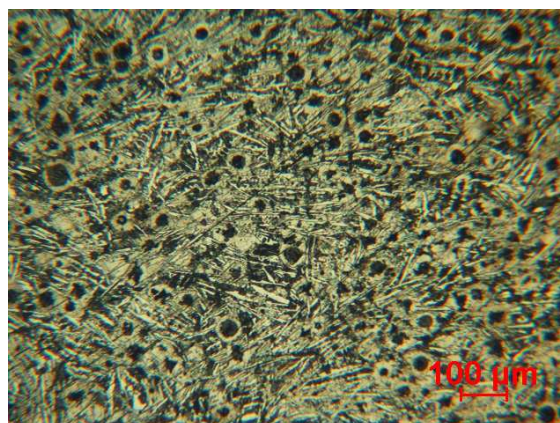


nital 100x

Obr. 3.7 Struktura destičky PT 01-3



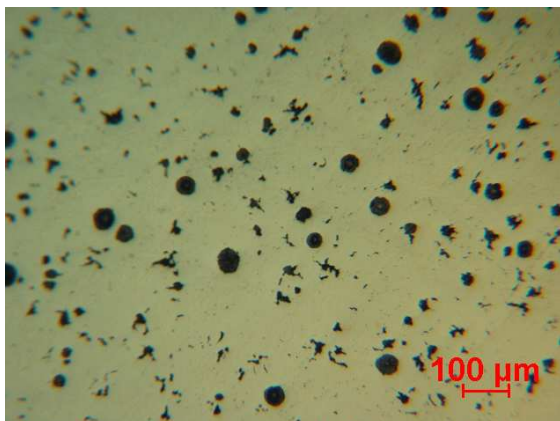
neleptáno 100x



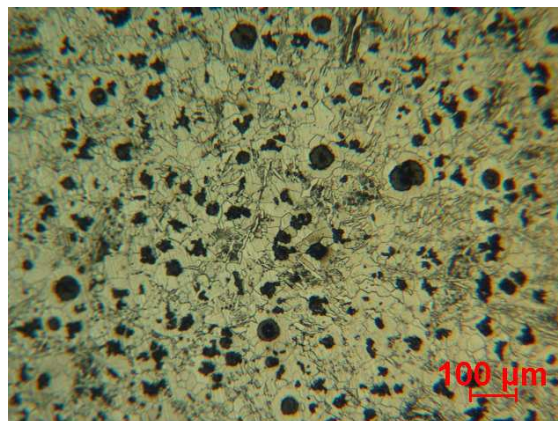
nital 100x

Obr. 3.8 Struktura destičky PT 01-4



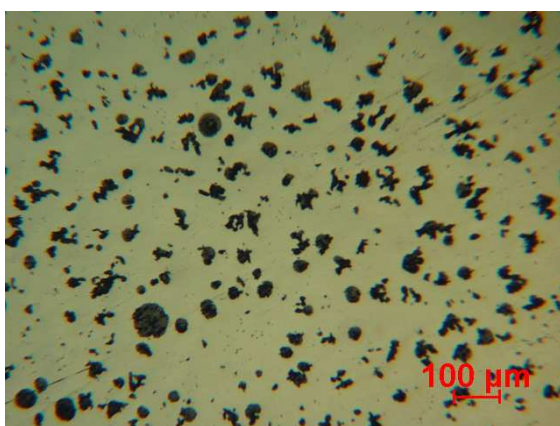


neleptáno 100x

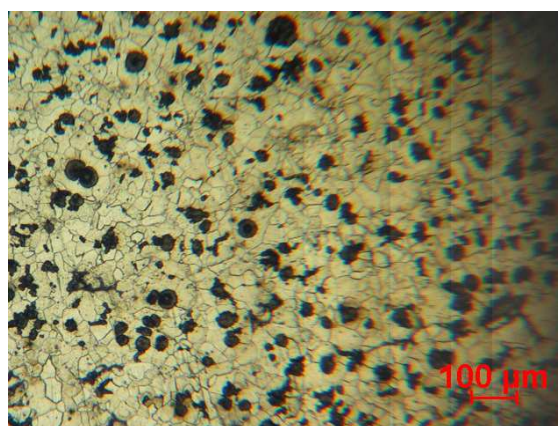


nital 100x

Obr. 3.9 Struktura destičky PT 01-5

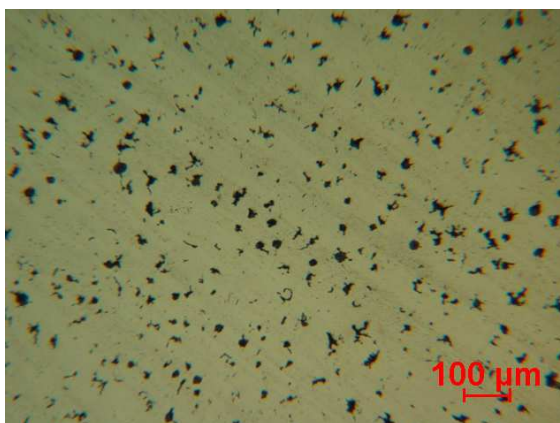


neleptáno 100x

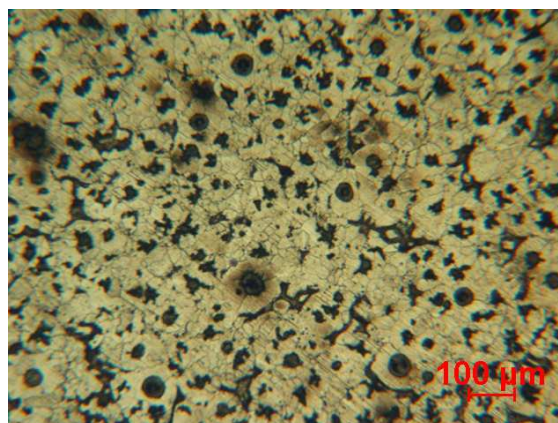


nital 100x

Obr. 3.10 Struktura destičky PT 01-8



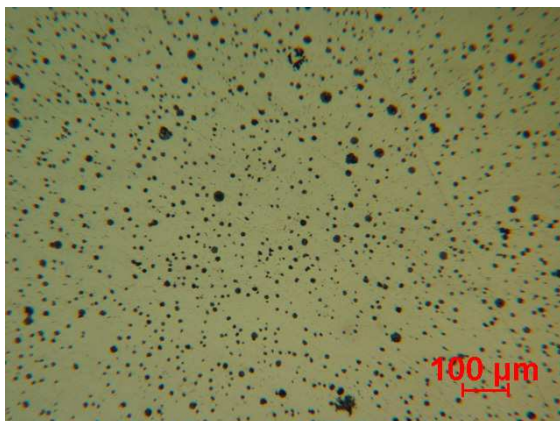
neleptáno 100x



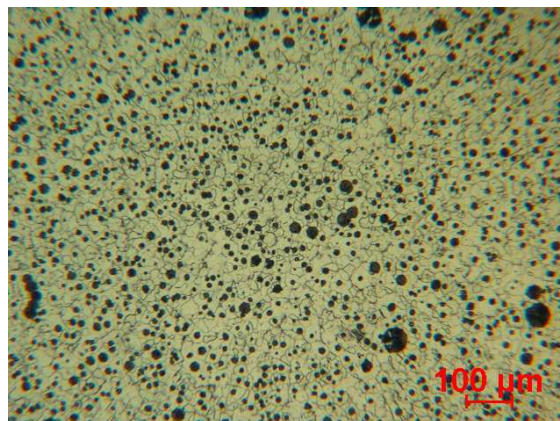
nital 100x

Obr. 3.11 Struktura destičky PT 01-10



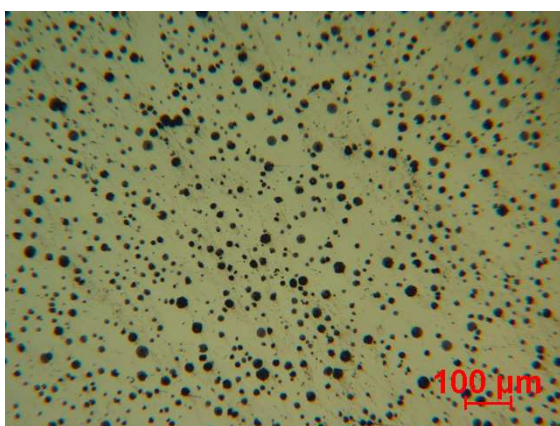


neleptáno 100x

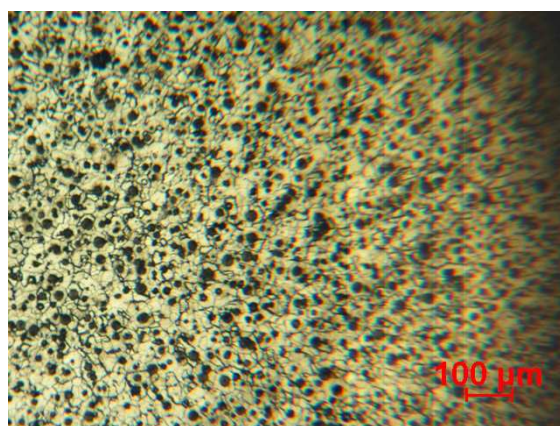


nital 100x

Obr. 3.12 Struktura destičky PT 02-3

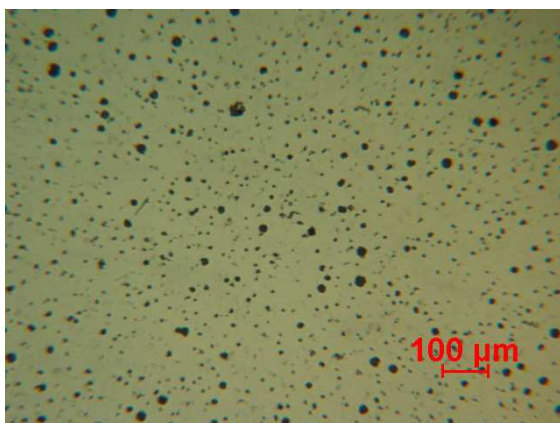


neleptáno 100x

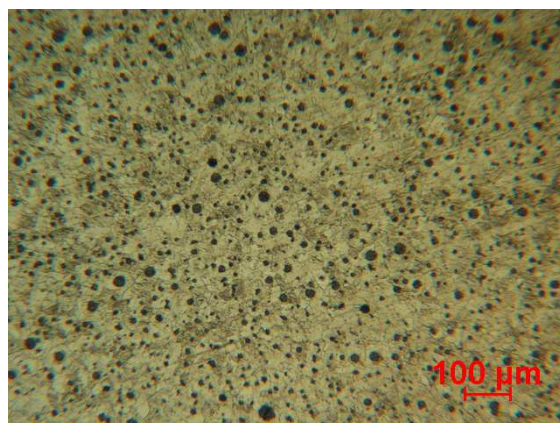


nital 100x

Obr. 3.13 Struktura destičky PT 02-4



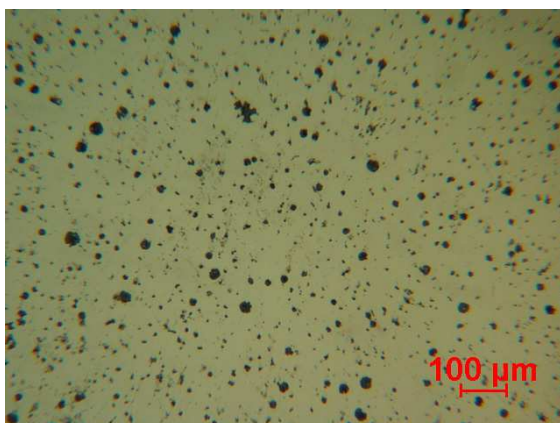
neleptáno 100x



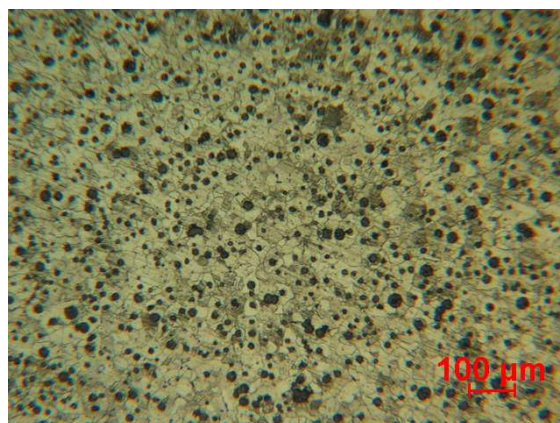
nital 100x

Obr. 3.14 Struktura destičky PT 02-5



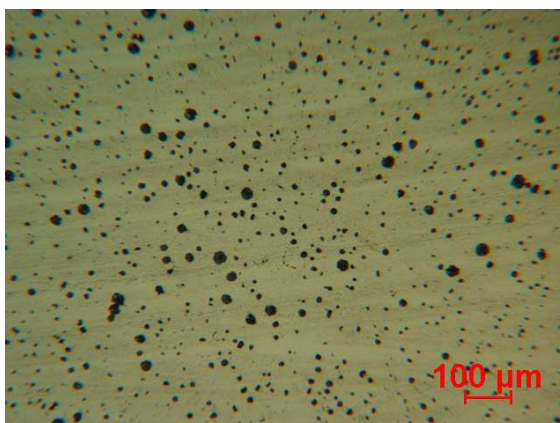


neleptáno 100x

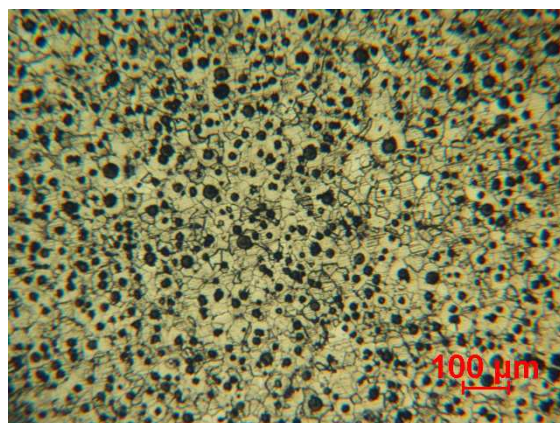


nital 100x

Obr. 3.15 Struktura destičky PT 02-8

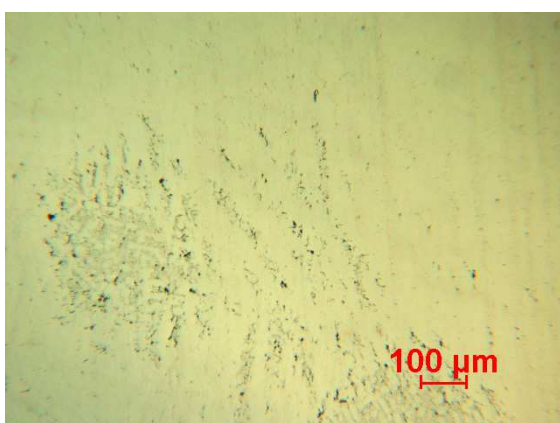


neleptáno 100x

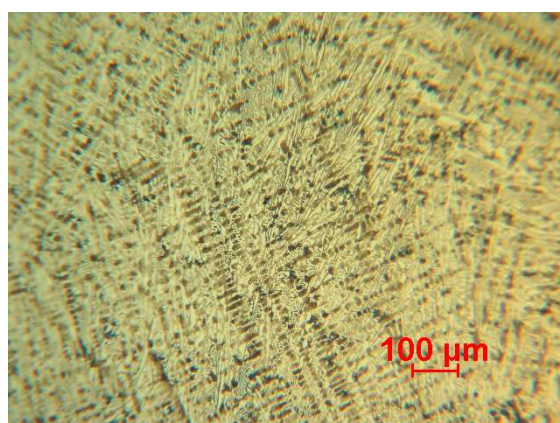


nital 100x

Obr. 3.16 Struktura destičky PT 02-10



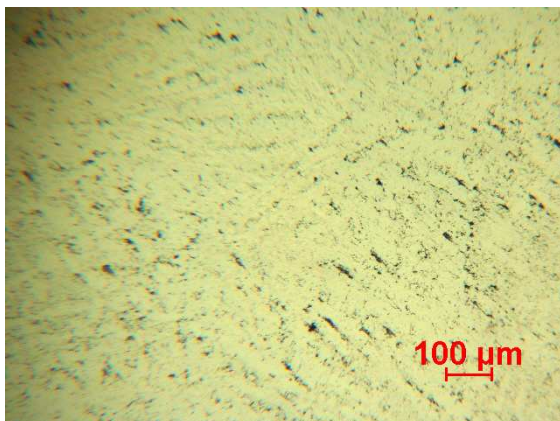
neleptáno 100x



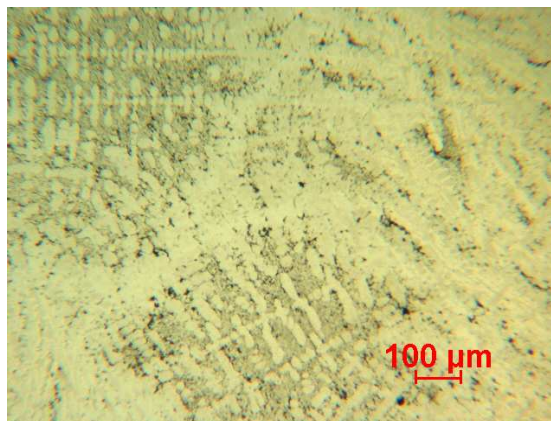
nital 100x

Obr. 3.17 Struktura destičky PT 03-3



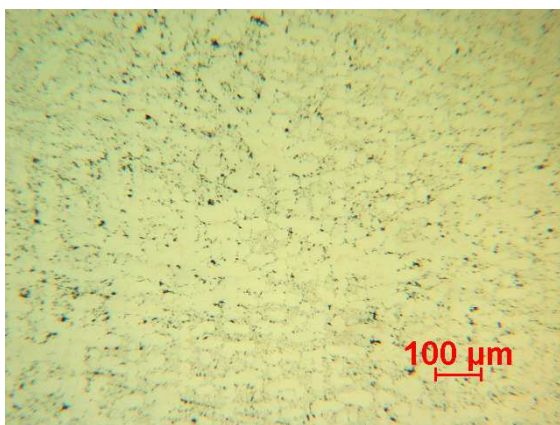


neleptáno 100x

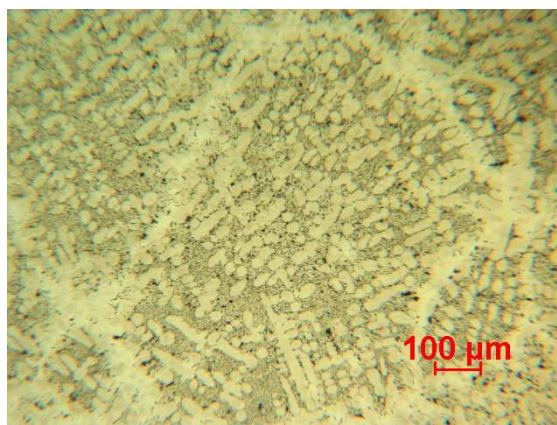


nital 100x

Obr. 3.18 Struktura destičky PT 03-4

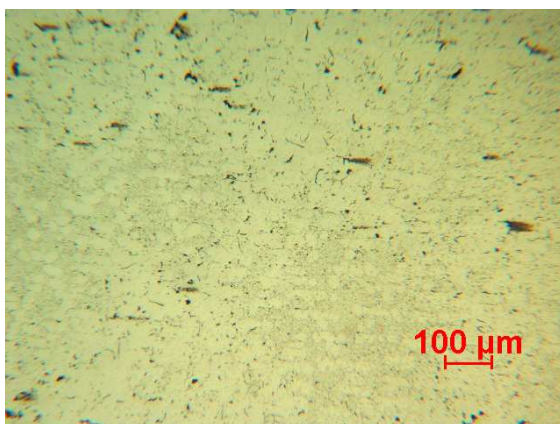


neleptáno 100x

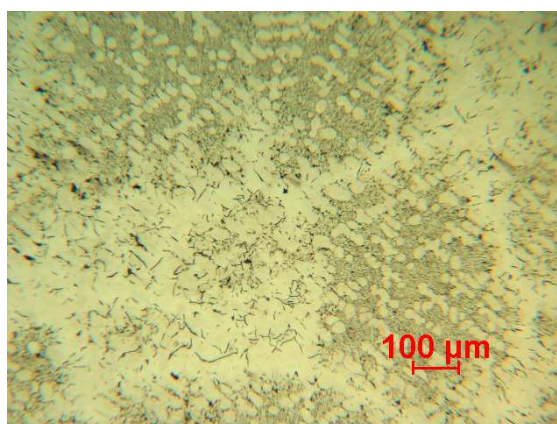


nital 100x

Obr. 3.19 Struktura destičky PT 03-5



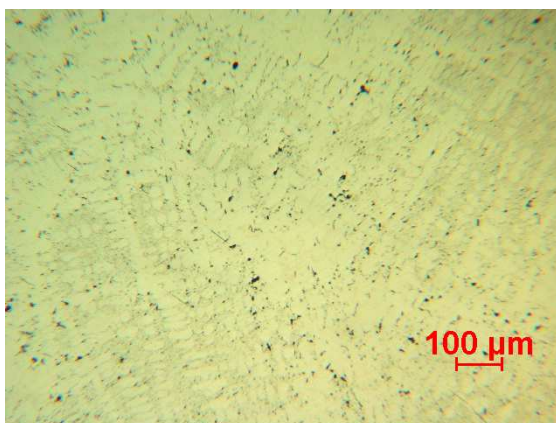
neleptáno 100x



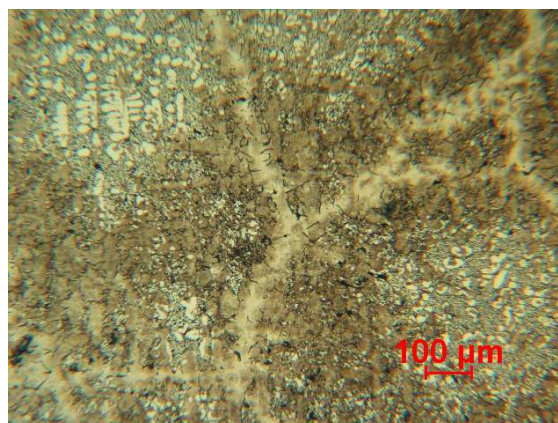
nital 100x

Obr. 3.20 Struktura destičky PT 03-8



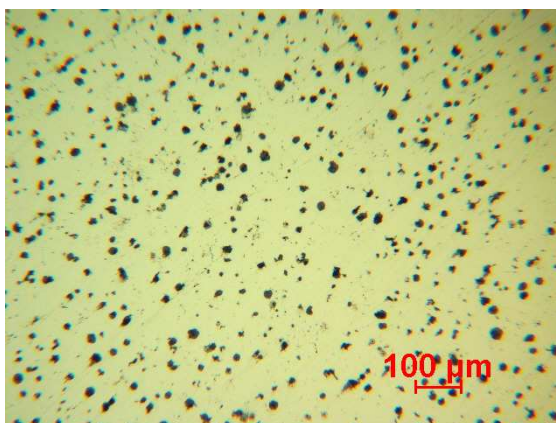


neleptáno 100x

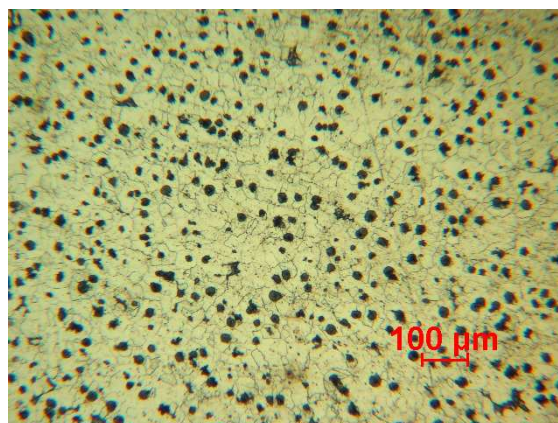


nital 100x

Obr. 3.21 Struktura destičky PT 03-10

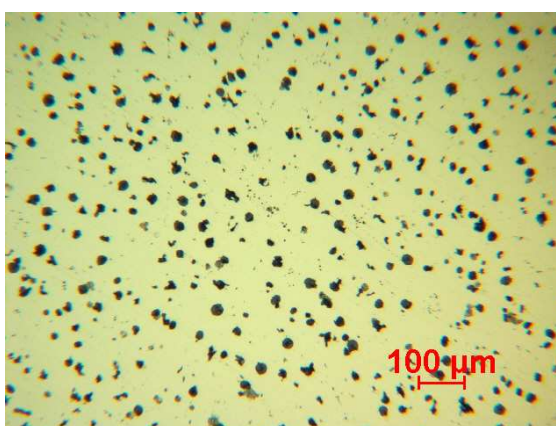


neleptáno 100x

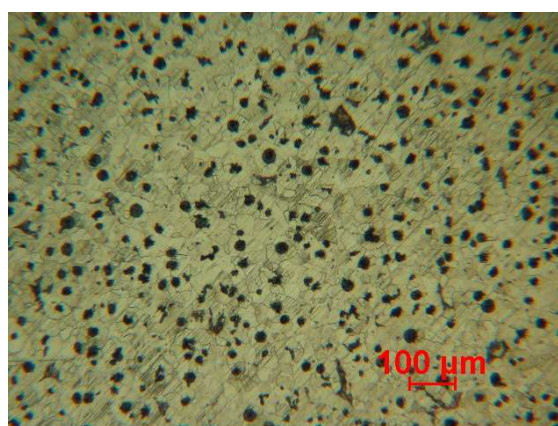


nital 100x

Obr. 3.22 Struktura destičky PT 04-3



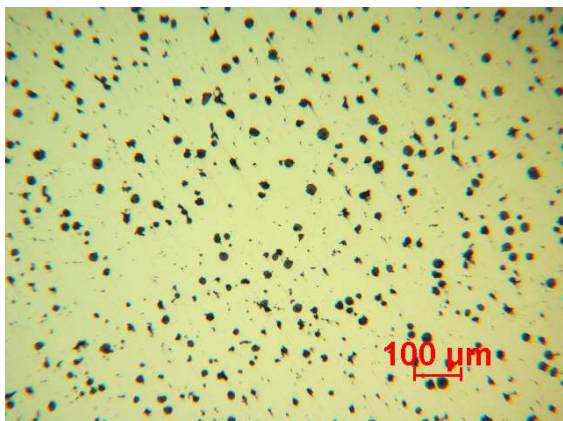
neleptáno 100x



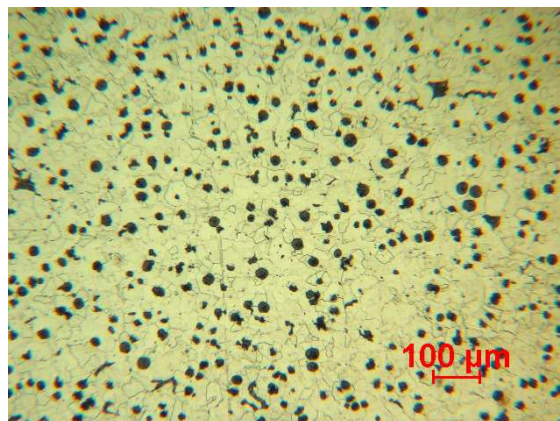
nital 100x

Obr. 3.23 Struktura destičky PT 04-4



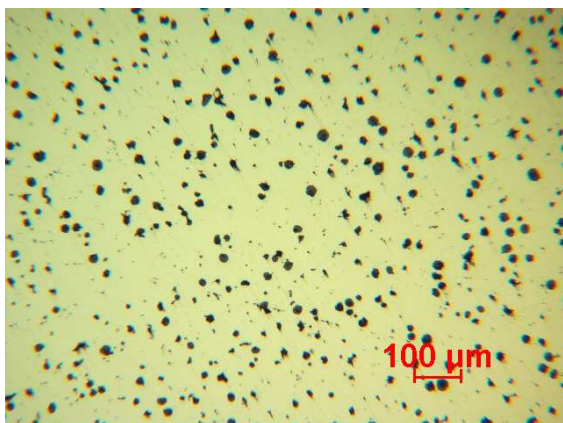


neleptáno 100x

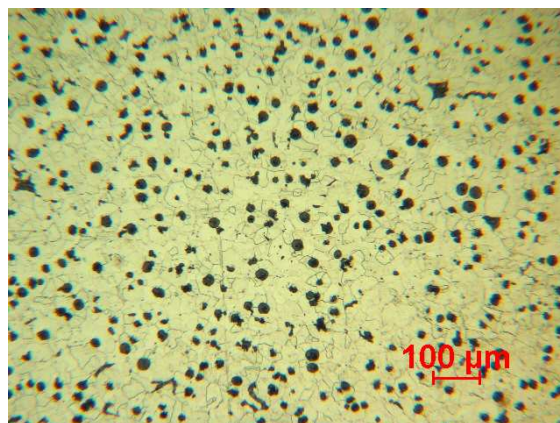


nital 100x

Obr. 3.24 Struktura destičky PT 04-4

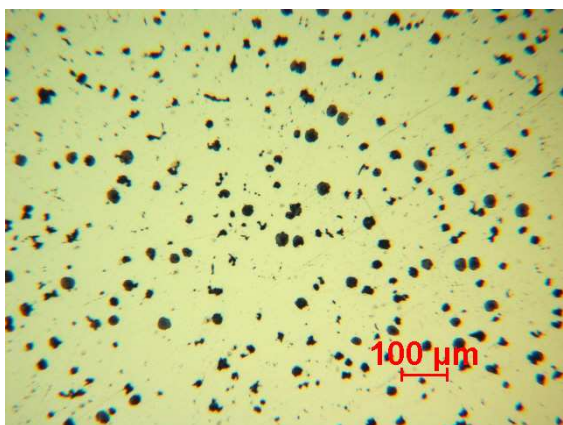


neleptáno 100x

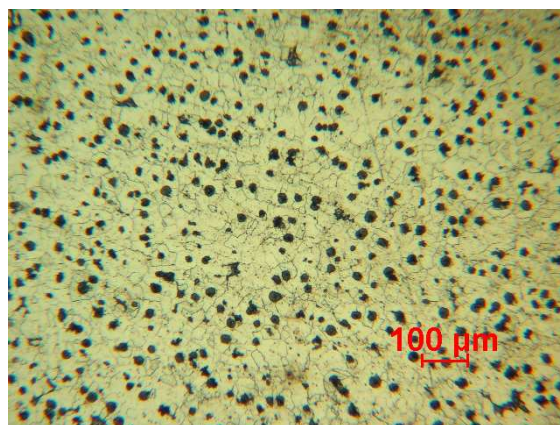


nital 100x

Obr. 3.25 Struktura destičky PT 04-5



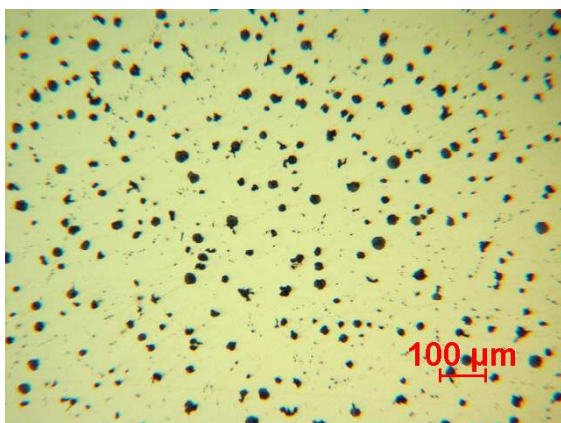
neleptáno 100x



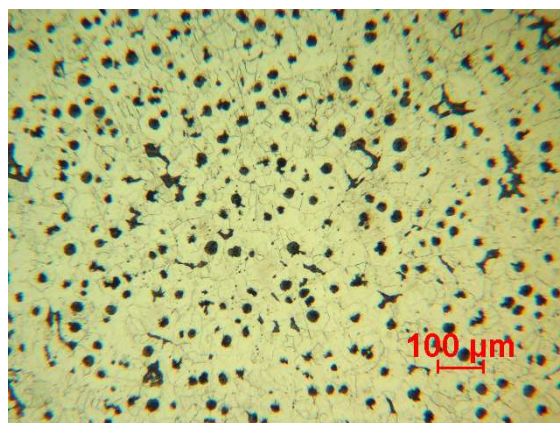
nital 100x

Obr. 3.26 Struktura destičky PT 04-8



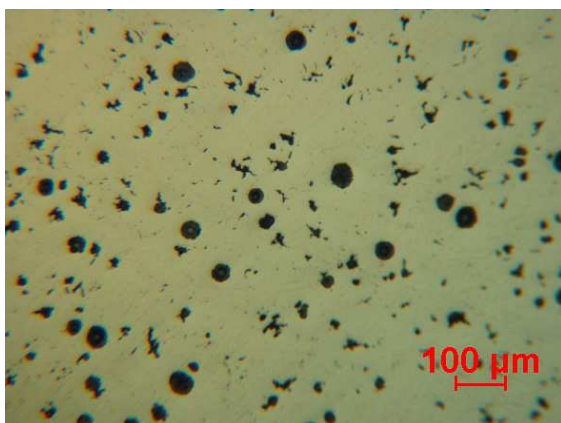


neleptáno 100x

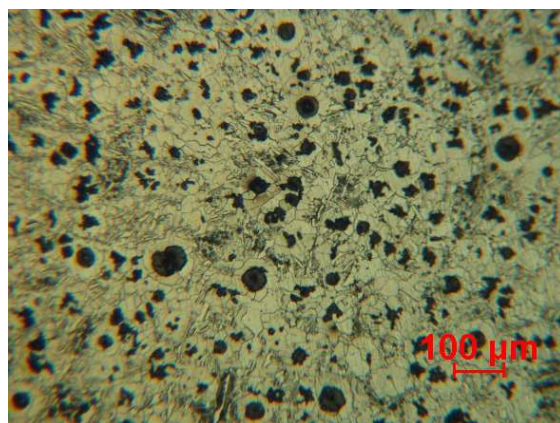


nital 100x

Obr. 3.27 Struktura destičky PT 04-10

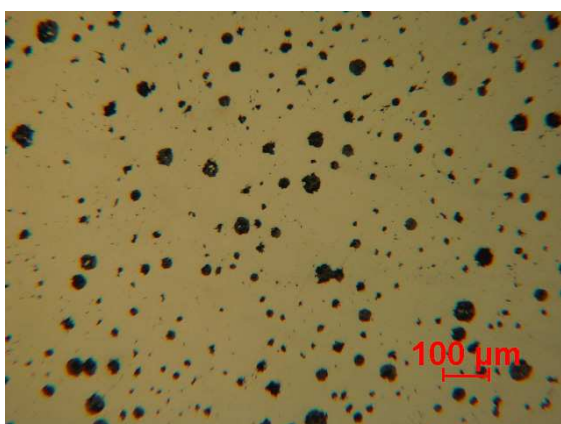


neleptáno 100x

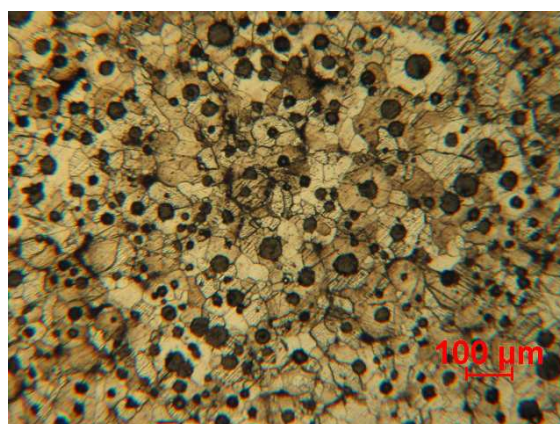


nital 100x

Obr. 3.28 Struktura Y-bloku PT 01Y

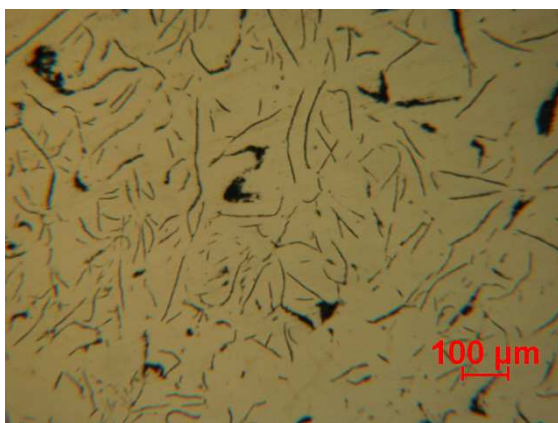


neleptáno 100x



nital 100x

Obr. 3.29 Struktura Y-bloku PT 02Y

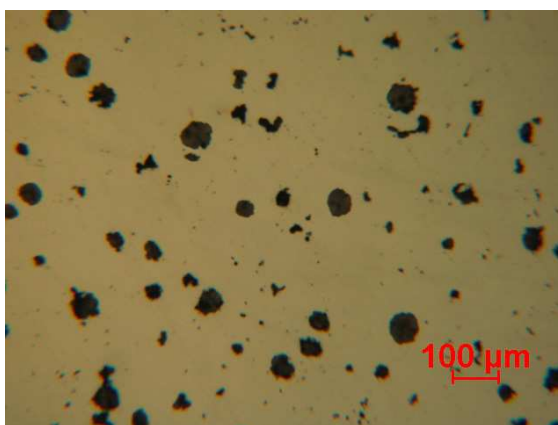


neleptáno 100x

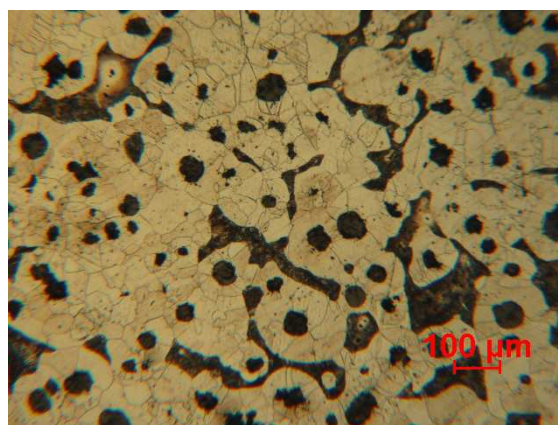


nital 100x

Obr. 3.30 Struktura Y-bloku PT 03Y



neleptáno 100x



nital 100x

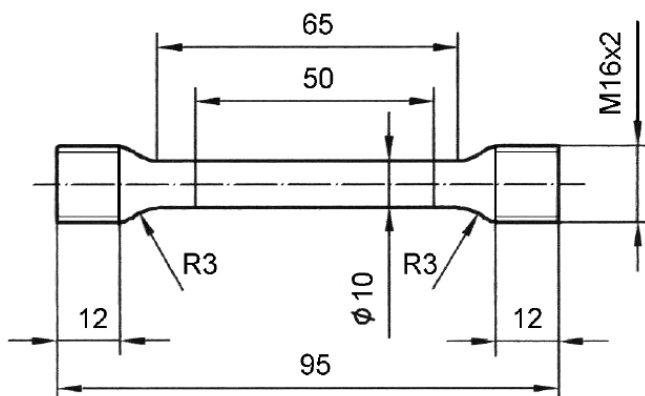
Obr. 3.31 Struktura Y-bloku PT 04Y

Tab. 3.11 Struktura destiček a Y-bloku

Tavba	tvár a velikost grafitu	základní kovová hmota
PT 01-3	50%VI6+50%VI7	P70 Fe30
PT 01-4	30%VI6+70%V7	P50 Fe50
PT 01-5	40%VI6+60%VI7	P20 Fe80
PT 01-8	20%VI6+80%VI7	P6 Fe94
PT 01-10	30%VI6+70%VI7	P6 Fe94
PT 01-Y	40%VI6+60%VI7	P20 Fe80
PT 02-3	10%VI6+90%VI7	Fe
PT 02-4	50%VI6+50%VI7	P6 Fe94
PT 02-5	30%VI6+70%VI7	P50 Fe50
PT 02-8	20%VI6+80%VI7	P45 Fe55
PT 02-10	100%VI7	P20 Fe80
PT 02-Y	20%VI6+80%VI7	P45 Fe55
PT 03-3	100%V8	ledeburit
PT 03-4	100%V8	ledeburit
PT 03-5	100%V8	ledeburit
PT 03-8	100%V8	ledeburit
PT 03-10	100%V8	ledeburit+P+Fe
PT 03-Y	60%I5+30%V6	P20 Fe80
PT 04-3	100%VI7	Fe
PT 04-4	100%VI7	P6 Fe94
PT 04-5	100%VI7	Fe
PT 04-8	60%VI7+40%V7	Fe
PT 04-10	100%VI7	P6 Fe94
PT 04-Y	100%VI7	P20 Fe80

#### 3.4.4 Stanovení meze pevnosti v tahu

Pro stanovení meze pevnosti v tahu byly zhotoveny zkušební vzorky o průměru 10 mm - viz obr. 3.32. Tyto vzorky byly odebrány ze spodní části Y-bloku.



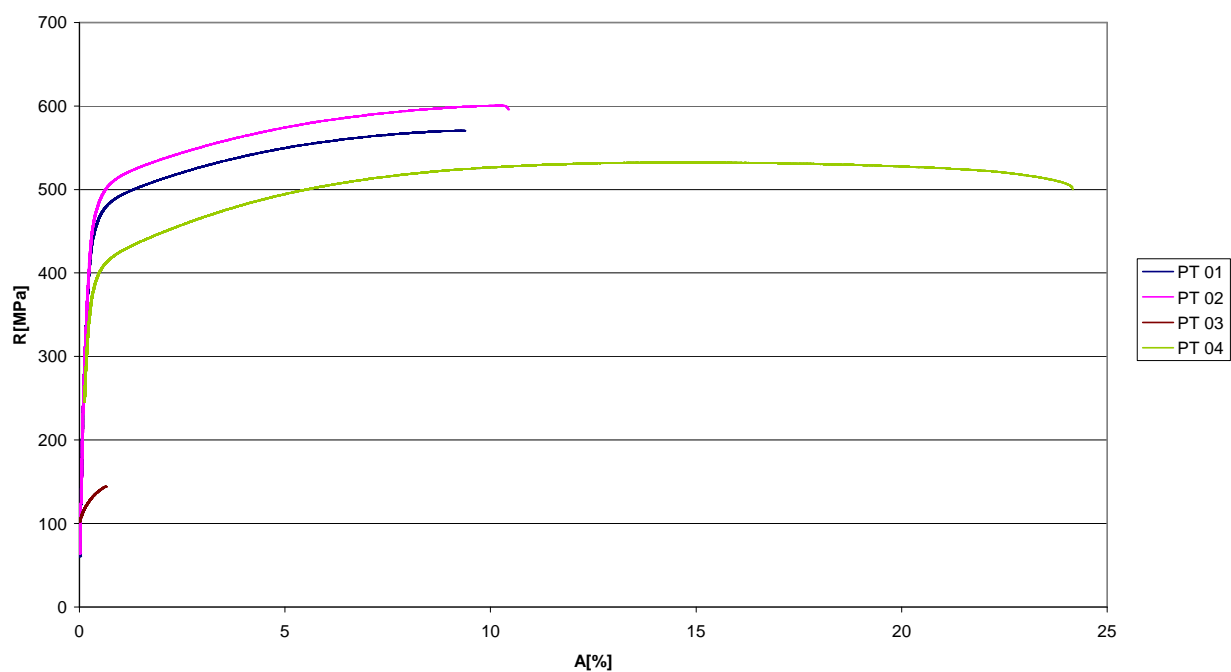
Obr. 3.32 Zkušební vzorek pro zkoušku tahem

Vlastní provádění měření pevnosti v tahu bylo použito zařízení TIRA test 2300 a extenzometr, který slouží k zaznamenání prodloužení zkušebního vzorku. Tahová síla byla měřena pomocí odporových tenzometru zabudovaných přímo na upínacím zařízení trhačího stroje. Po upevnění zkušební vzorku do upínacího zařízení trhačího stroje byl přistaven extenzometr, který byl nastaven na základní měřenou délku  $l_0=50$  mm. Potom byly zaneseny do počítače všechny potřebné údaje (délka, průměr atd.) Postupným zatěžováním vzorku vnější tahovou silou došlo k jeho přetržení. Výsledná data tahového napětí a deformace byly zpracovány pomocí MS Excel.

Tab. 3.12 Mez pevnosti v tahu

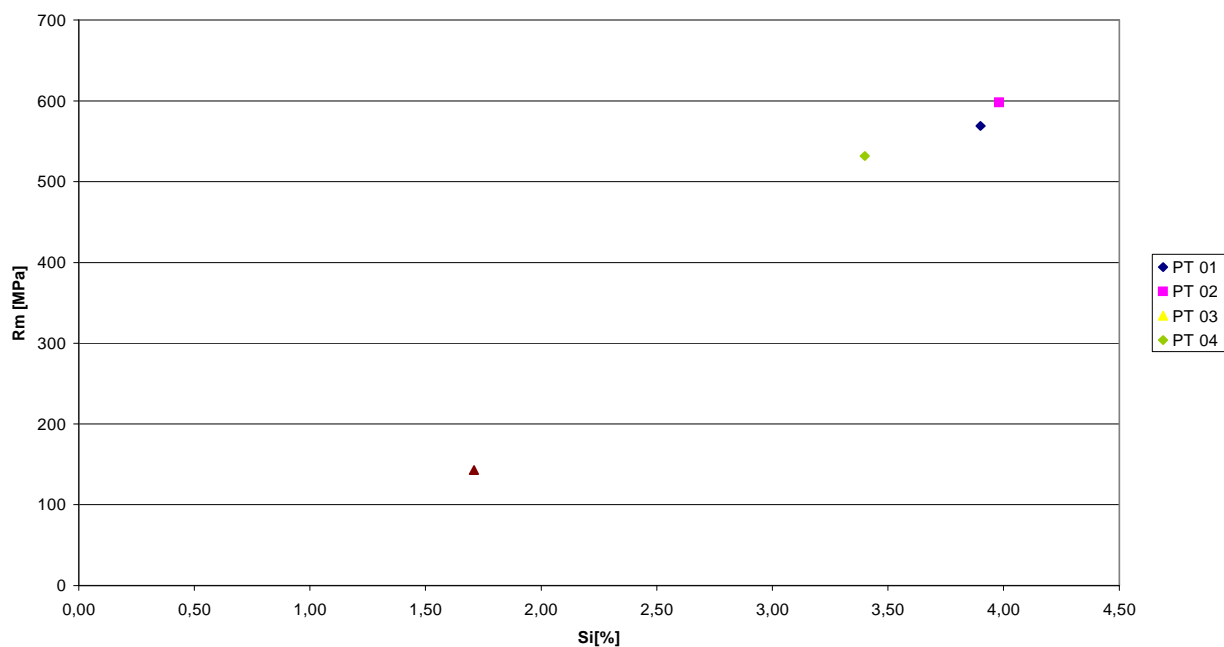
Tavba	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>5</sub> [%]
PT 01-Y	569	8,6
PT 02-Y	598	10,3
PT 03-Y	143	0,7
PT 04-Y	532	14,9

## ZKOUŠKA TAHEM

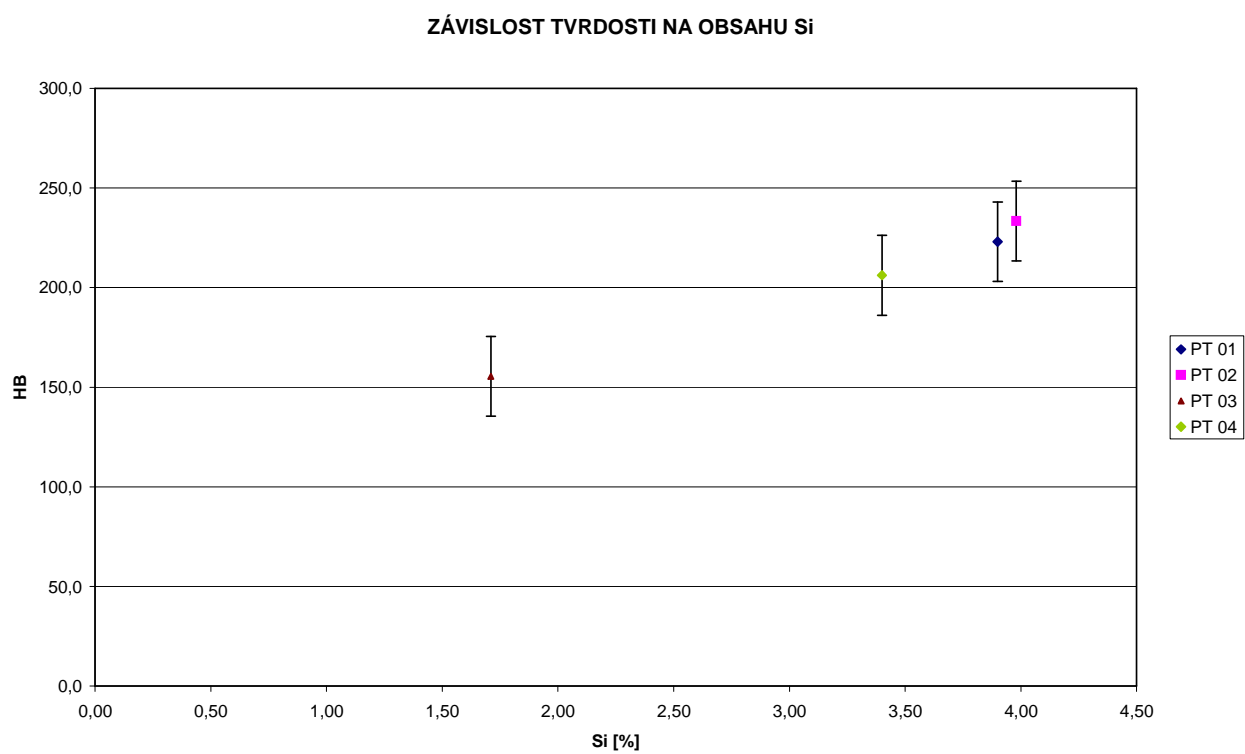


Obr. 3.33 Závislost napětí na tažnosti (Y-blok)

## ZÁVISLOST PEVNOSTI NA OBSAHU Si



Obr. 3.34 Závislost meze pevnosti v tahu na obsahu Si (Y-blok)



Obr. 3.35 Závislost tvrdosti na obsahu Si (Y-blok)



#### 4. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Experimenty prováděné v rámci této diplomové práce přinesly další poznatky o výrobě tenkostěnných odlitků (o tloušťce 3 až 10 mm) z litiny s kuličkovým grafitem o vyšším obsahu křemíku cca okolo 3%, které shrnul prof. BJÖRKEGREN [17] ze Švédska, který se zabývá výrobou litiny s vyšším obsahem Si. Výsledky jeho výzkumu byly zpracovány do ISO 1083:2004 (E). Tato litina by měla mít homogenní mechanické vlastnosti nezávislé na tloušťce stěny odlitku a při feriticko-perlitické matici mez pevnosti v tahu 500 MPa a tažnost 10 %. Uplatnění této litiny je např. při výrobě části přední nápravy nákladních automobilů, atd.

Křemík patří mezi základní prvky obsažené v litině. Křemík má v litinách grafitizační účinek tím, že podporuje vyloučení uhlíku ve formě grafitického eutektika a ne ve formě cementitu. Jak již bylo zmíněno, křemík podporuje vznik feritické základní kovové matrice a dále posouvá eutektický bod směrem doleva. Křemík posouvá mechanické vlastnosti feritu k vyšším hodnotám, zvyšuje jeho pevnost a tvrdost a snižuje tažnost.

V této souvislosti je nutno připomenout, že jsem prostudoval pro zdárný průběh experimentů této diplomové práce velké množství odborné literatury, která mi usnadnila volbu technologických parametrů.

Ze získaných výsledků je patrné, že nelze ihned přesně stanovit všechny zásady přípravy taveniny, tak aby vedly k docílení předpokládaných příznivých výsledků. Proto bylo nutno postupně zpřesňovat množství jednotlivých vsázkových surovin a současně k nim přiřazovat určitá množství křemíku.

Jak je patrné z obr. 3.6 (Závislost tvrdosti na tloušťce destiček) a tab. 3.9 (Naměřené hodnoty tvrdosti destiček a vypočítané hodnoty aritmetického průměru a směrodatné odchylky), tak u taveb PT 02 a PT 04 byla přibližně dosažena požadovaná homogenita tvrdosti zkušebních vzorků. U taveb PT 01 a PT 03 tato vlastnost nebyla splněna. Jak je patrné z již zmiňovaného obr. 3.6, tak u taveb PT 01 a PT 03 u destiček o tloušťce 3 a 4 mm tvrdost destiček v některých případech převyšovala 300 HB což je nepřípustné. U tavy PT 01 je vyšší tvrdost destiček způsobena velkým obsahem perlitu v základní kovové hmotě dané litiny - viz obr. 3.7 a obr. 3.8. U tavy PT 03 je tvrdost dána

přítomností ledeburitu ve struktuře litiny - viz obr. 3.17 a obr. 3.18. Naproti tomu u tavby PT 02 tvrdost se vzrůstající tloušťkou destiček se nepatrně zvětšovala z hodnoty 217 do 231 HB - viz obr. 3.6. Tato vlastnost je způsobena tím, že vzorek PT 02-3 obsahoval více feritu, než vzorky o větší tloušťce - viz obr. 3.12 až 3.16. U tavby PT 04 se tvrdost destiček se vzrůstající tloušťkou nepatrně snižovala.

Nejhorších mechanických vlastností bylo dosaženo u tavby PT 03, která měla mez pevnosti v tahu 143 MPa, tažnost 0,7 % - viz tab. 3.13 a tvrdost 156 HB viz tab. 3.10. Tyto nevyhovující mechanické vlastnosti jsou způsobeny nevyhovující mikrostrukturou vzorku (60%I5+30%V6) - viz obr. 3.30, která je způsobena malým množstvím křemíku 1,71 % a vyšším množstvím fosforu 0,117 % a síry 0,036 % - viz tab. 3.8. Největší tažnosti bylo dosaženo u vzorku, který pocházel z tavby PT 04. Tato hodnota tažnosti byla 14,9 % a k tomu odpovídající mez pevnosti byla 532 MPa - viz tab. 3.12. V tomto případě byla tvrdost 206 HB - viz tab. 3.10. Mikrostruktura vzorku je zobrazena na obr. 3.31, kde je grafit 100%VI7, obsah perlitu 80 % a feritu 20 %. Největší pevnost 598 MPa měla tavba PT 02, která měla tažnost 10,3 % - viz tab. 3.12 a tvrdost 233 HB - viz tab. 3.10. Tyto vysoké mechanické vlastnosti jsou způsobeny velkým podílem perlitu ve struktuře (P45 Fe55). Tavba PT 01 měla pevnost v tahu 569 MPa, tažnost 8,9 % - viz tab. 3.13 a tvrdost 223 HB - viz tab. 3.10.

Jak je patrné z obr. 3.34 a obr. 3.35, tak se vzrůstajícím obsahem Si se zvyšovalo napětí na přetržení vzorku i tvrdost odlitků. Vyšší hodnoty mechanických vlastností jsou u taveb s vyšším obsahem křemíku nejspíše způsobeny zpevněním feritu křemíkem.

Jak je z výsledků struktur destiček u tavby PT 04 patrné, odpovídají převážně feritické, popř. feritické struktuře s nepatrným množstvím perlitu - viz tab. 3.11. Avšak vyšší množství perlitu cca 20 % bylo obsaženo ve struktuře sledované litiny z odlitků Y-bloku. Toto zvýšené množství perlitu bylo pravděpodobně způsobeno odeznívajícím účinkem očkovadla, neboť Y-bloky byly odlévány až po destičkách.

Ještě dále je nutno konstatovat, že norma ČSN EN 1563 (Slévárství – Litiny kuličkovým grafitem) obsahuje přílohu, která se týká litiny s kuličkovým



grafitem a vyšším obsahem křemíku. Tato část normy hodnotí mechanické vlastnosti sledované litiny. U tloušťky stěny odlitku cca 30 mm je předepsaná pevnost v tahu 500 MPa a tažnost 10 %. Všechny tři tavby (PT01, PT02 a PT04) se této hodnotě tažnosti přibližují na vzorcích z Y-bloků.

Současně je nutno konstatovat, že tyto tavby byly zaměřeny nejen na stanovení vhodného podílu sorelu a různého množství vratného materiálu (jak z Komerční slévárny šedé a tvárné litiny v Turnově, tak z našich předchozích taveb) v souvislosti s modifikátorem MgFeSi a určitým podílem KVZ. Jak je patrné, výhodné složení vsázkových surovin je: 7,41 kg sorelu, 15,29 kg (vrat Komerční slévárna šedé a tvárné litiny v Turnově) 6,06 kg (vrat TUL) a 0,07 kg FeSi75. Dále při standardním zachování postupu modifikace a očkování je vyhovující toto množství modifikátorů: 0,515 kg MgFeSi a 0,0045 kg KVZ a množství očkovadel: 0,17 kg FeSi75 a 0,11 kg Superseed.

Z výsledků doktorské práce ŠMRHA [18] je patrné, že jeho počáteční etapa výzkumu byla zaměřena na sledování vhodnosti modifikátoru KVZ (kovy vzácných zemin). Po několika provedených tavnách s neuspokojivými výsledky struktury byl použit modifikátor na bázi hořčíku prostřednictvím předslitiny (obchodní název LAMET 5504). Další jeho výzkum byl zaměřen také na stanovení vhodného množství a typu očkovadel.

## 5. ZÁVĚR

Cílem mé diplomové práce bylo shrnout, zpracovat a následně prozkoumat požadavky na chemické složení vsázky pro výrobu tenkostěnných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem Si.

Diplomová práce je rozdělena do dvou základních částí: rešeršní a experimentální. V první části tj. rešeršní byly shrnuty poznatky o přípravě a výrobě litiny s kuličkovým grafitem. V druhé části t.j. experimentální bylo sepsáno vlastní provádění taveb (příprava vsázky, tavení, modifikace a očkování) a hodnocení odlitků (mechanické vlastnosti, struktury a chemické složení taveb).

Cílem experimentální části práce bylo zjištění praktického chování LKG s vyšším obsahem křemíku. Z provedených experimentů lze vyvodit několik základních dílčích závěrů:

1. Pro výrobu litiny s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku je nutná pečlivá příprava metalurgického procesu, včetně volby vhodného tavícího agregátu, tj. elektrické středofrekvenční indukční pece. A dále použití vhodného technologického režimu tavení, modifikace a očkování taveniny. Zejména je třeba neudržovat taveninu příliš dlouhou dobu na odpichové teplotě. Po vylití taveniny z pece a proběhlé modifikaci a očkování je nutno ihned zahájit vlévání taveniny do předem připravených forem.
2. Nutnost použít vhodné modifikační a odlévací zařízení, správnou teplotu přehřevu a zejména dodržovat bezpečnost práce při manipulaci s taveninou.
3. Pro výrobu tenkostěnných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem je důležité volit vhodné vsázkové suroviny (surové železo s nízkým obsahem fosforu a síry, vlastní vratný materiál z předchozích taveb, případně vratný materiál z LKG s feritickou matricí). Také je nezbytné přesné navážení jednotlivých komponent.

4. Zvolit správnou volbu formovací směsi pro výrobu forem, bez znehodnoceného pojiva či ostřiva. Současně dbát i na konstrukci forem z hlediska tepelných uzlů ve formě.
5. Z důvodu, že diplomová práce má ryze výzkumný charakter, nebylo provedeno ekonomické hodnocení výroby litiny s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku.

## 6. LITERATURA

- [1] DUNG, N.: Výroba tvárné litiny metodou Kontinuální modifikace (Disertační práce) Ostrava 1992
- [2] HANZL, S.; RŮŽIČKA, A.: Metalurgie a technologie slévárenských slitin ČVUT 1991
- [3] KARSAY, S. I: Tvárná litina I. Výroba. QIT-FER ET TITANE INC, Fompex, s.r.o., Trenčín, 1996.
- [4] PLACHÝ, J.; NĚMEC, M.: Metalurgie a technologie slévárenských slitin ČVUT 1993
- [5] ROUČKA, J.: Metalurgie litin. [Skripta]. VUT Brno, 1998
- [6] SÝKORA, P.: Tvárná litina , Technické informace Praha, 1982
- [7] VÁVRA, P.: Strojnické tabulky SNTL 1983
- [8] KOSEK, P.: Vliv KVZ na aktivitu kyslíku a efektivnost modifikace u grafitických litin. (Diplomová práce). FS -TU Liberec, 2003
- [9] DORAZIL, E.: Nauka o materiálu VUT Brno 1989
- [10] ŠMRHA, J.: Zásady výroby tenkostěnných odlitků z litiny s červíkovým grafitem pro automobilový průmysl (Diplomová práce) TU-Liberec, 2004
- [11] NOVÁ, I.: Teorie slévání I. [Skripta]. FS-TU Liberec, 2006

- [12] NOVÁ, I.: Teorie slévání II. [Skripta]. FS-TU Liberec, 2007
- [13] NOVOTNÝ, I.: Technologie I. [Skripta]. ČVUT, 1999
- [14] VONDRÁK, V.: Metalurgie litin (mimopecní zpracování roztavené litiny). [Skripta]. VŠB-TU Ostrava, 2005
- [15] JUNEK, L.: Výroba litin s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem Si pro automobilový průmysl. [Diplomová práce]. TU Liberec, 2008
- [16] PÍŠEK, F., JENÍČEK, L., RYŠ, P.: Nauka o materiálu I/4. Praha: Academia, 1975.
- [17] BJÖRKEGREN, L.E.: Ductile iron with better mechanibility compared to convecntional grades. Technical paper–Ductile iron, FOUNDRYMAN December 1998 p. 386 to 391.
- [18] ŠMRHA, J.: Vliv zvýšeného obsahu křemíku na mechanické vlastnosti tenkostěnných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem (Disertační práce) TU-Liberec, 2009

## **Prohlášení**

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

5. 6. 2009

.....

## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

5. 6. 2009

.....